史冀忠,姜亭,韩小锋,等. 甘蒙北山地区扎格高脑盆地白垩系黑色页岩地球化学特征及沉积古环境.吉林大学学报(地球科学版),2026,56(4):1203-1226. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240147.
Shi Jizhong,Jiang Ting,Han Xiaofeng, et al. Geochemical Characteristics and Sedimentary Paleoenvironment of Cretaceous Black Shales in Zhagegaonao Basin, Beishan Area, Gansu-Inner Mongolia. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2026,56(4):1203-1226. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240147.

甘蒙北山地区扎格高脑盆地白垩系黑色页岩地球化学特征及沉积古环境

史冀忠[1,2],姜 亭[1,2],韩小锋[1,2],王宝文[1,2],许 伟[1,2],宋 博[1,2]
1.中国地质调查局西安地质调查中心(西北地质科技创新中心),西安 710054
2.中国地质调查局北方古生界油气地质重点实验室,西安 710054

摘要:甘蒙北山地区白垩系赤金堡组发育一套有机碳质量分数较高的黑色页岩,显示出良好的油气勘探前景,对其沉积古环境的研究亟待加强。本文基于扎格高脑盆地MGD1井白垩系岩心资料,等间距采集相关样品,运用X射线荧光光谱法、X射线衍射法和电感耦合等离子质谱仪法研究黑色页岩的地球化学特征,恢复其沉积时的古气候、古盐度、古水深和氧化还原条件,并应用孢粉资料对古气候进行验证。研究表明:黑色页岩主要为泥质页岩,其物源主要为长英质岩石,属于近源沉积,未经历沉积再循环,并且后期未受热液作用影响,可以利用其地球化学数据进行古环境分析。综合分析Sr、Ba、Cu、B、V、Ni、Co等环境敏感元素,并在孢粉数据的约束下发现:MGD1井黑色页岩下段沉积于干热、咸水、还原的环境,古水深呈现振荡上升;中段沉积于温暖潮湿、半咸水、还原的环境,古水深保持高位震荡;上段沉积于干热、咸水、还原的环境,古水深略有下降。MGD1井黑色页岩有机质富集受古气候、古盐度、古水深和氧化还原条件等因素共同控制。

关键词:北山地区;白垩系;黑色页岩;地球化学;古环境;扎格高脑盆地
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240147 **中图分类号**:P59;P618.13 **文献标志码**:A

Geochemical Characteristics and Sedimentary Paleoenvironment of Cretaceous Black Shales in Zhagegaonao Basin, Beishan Area, Gansu-Inner Mongolia

Shi Jizhong[1,2], Jiang Ting[1,2], Han Xiaofeng[1,2], Wang Baowen[1,2], Xu Wei[1,2], Song Bo[1,2]
1. *Xi'an Center of China Geological Survey (Northwest China Center for Geoscience Innovation), Xi'an* 710054, *China*
2. *Key Laboratory of Paleozoic Oil and Gas Geology in Northern China, China Geological Survey, Xi'an* 710054, *China*

收稿日期:2024-06-30
作者简介:史冀忠(1983—),男,正高级工程师,硕士,主要从事沉积学及油气基础地质调查方面的研究,E-mail:shijizhong0241@sina.com
通信作者:姜亭(1978—),男,正高级工程师,硕士,主要从事油气基础地质调查方面的研究,E-mail:929726833@qq.com
基金项目:中国地质调查局项目(DD202402008,DD20240200805);陕西省自然科学基金项目(2024JC-YBMS-204)
Supported by the Project of China Geological Survey (DD202402008, DD20240200805) and the Natural Science Foundation Project of Shaanxi Province (2024JC-YBMS-204)

Abstract: The Cretaceous Chijinbao Formation has developed a suite of black shales with high organic content, indicating significant potential for oil and gas exploration in the Beishan area of Gansu and Mongolia. Further research into the sedimentary paleoenvironment of these black shales is necessary to enhance our understanding. Based on the MGD1 Cretaceous core data in Zhagegaonao basin, samples were collected at equal intervals. The geochemical characteristics of black shale have been studied by X-ray fluorescence spectrometry, X-ray diffraction, and inductively coupled plasma mass spectrometry. The paleoclimate, paleosalinity, paleowater depth, and oxidation-reduction conditions of black shale formation were reconstructed with geochemical data and verified by palynological data. The black shales are mainly argillaceous shale. The provenance is predominantly feldspar rock, and they are near-source sediments, which have not undergone sedimentary recycling and have not been affected by later hydrothermal action. The paleoenvironment can be analyzed with its geochemical data. The comprehensive analysis of environmentally sensitive elements, such as Sr, Ba, Cu, B, V, Ni, Co, shows that the lower section of black shale in well MGD1 was deposited in the dry-hot, saline-water and reductive environment, and the paleowater depth rose with oscillation. The middle section of black shale was deposited in warm, humid, brackish water and reductive environment, and the paleowater depth kept high oscillation. The upper section of black shale was deposited in a dry-hot, saline-water and reductive environment, and the paleowater depth decreased slightly. The accumulation of organic matter in the black shale in well MGD1 is the result of the combined action of paleoclimate, paleosalinity, paleowater depth, and oxidation-reduction conditions.

Key words: Beishan area; Cretaceous; black shale; geochemistry; paleoenvironment; Zhagegaonao basin

0 引言

黑色页岩是一种富含黏土矿物和有机质的特殊沉积岩[1],不仅是油气生成与聚集的重要地质体,还可以记录地质历史时期的生命演化、环境变迁和气候变化[2]。前人通过大量的研究得出一系列用地球化学特征值来重建沉积古环境的指标[3-5]。由于黑色页岩中有机质的富集、发育和分布受沉积环境的控制,因此根据黑色页岩的地球化学特征进行古环境重建,对于含油气盆地油气勘探具有重要的应用价值[6]。

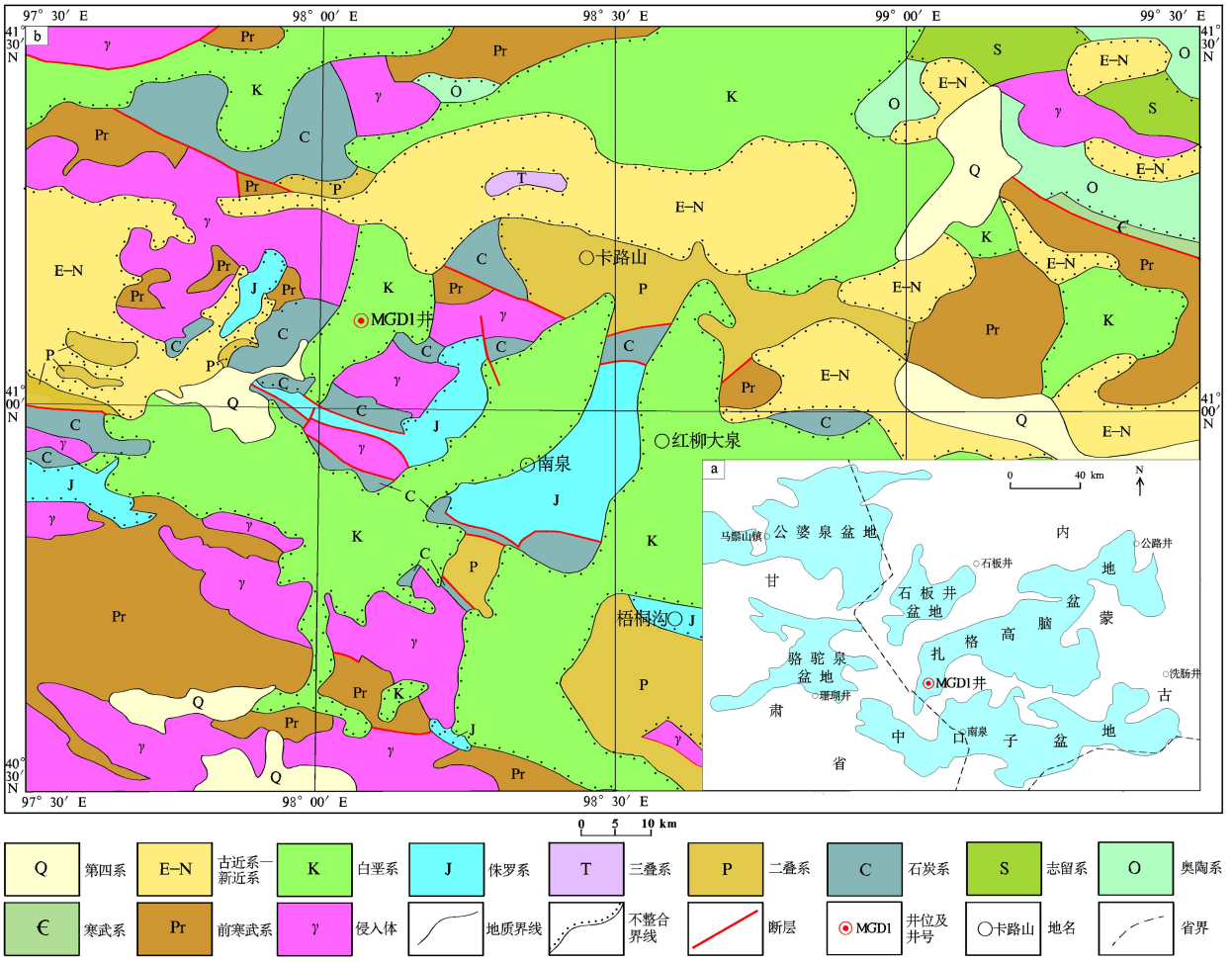
甘蒙北山地区为我国重要的金属成矿带之一,前人对区域构造、岩浆活动和成矿规律等进行了深入的研究[7-10]。但针对中生界白垩系的研究较少,主要集中在烃源岩特征[11]、沉积体系[12]、生储盖特征[13-14]及砂岩型铀矿[15-16]等,缺乏对中生界白垩系沉积古环境的研究。

为了明确北山盆地群白垩系烃源岩发育情况及油气有利勘探区,中国地质调查局在扎格高脑盆地南部钻探了一口地质井(MGD1井),钻穿白垩系,基底为石炭系火山岩。本文以该井白垩系岩心为研究对象,连续等间距采样,在宏观、微观岩石学特征研究基础上,对黑色页岩进行地球化学测试分析,定量或半定量地恢复其沉积时的古气候、古盐度、古水深和氧化还原条件等,以期为北山地区中生界沉积演化和油气勘探提供科学依据。

1 地质概况

北山地区位于甘肃省西北部及内蒙古自治区西部,大地构造位置处于华北板块、塔里木板块、哈萨克斯坦板块和西伯利亚板块的交会带[17]。分布的中生代盆地有中口子盆地、扎格高脑盆地、骆驼泉盆地、石板井盆地和公婆泉盆地等,各盆地形态不规则,面积差异较大[13,15](图1),其中中口子盆地和扎格高脑盆地面积较大。

MGD1井位于扎格高脑盆地的南部(图1),井深395.16 m,揭示的地层包括第四系(9.74 m)、白垩系(282.92 m)和石炭系(102.50 m)(图2)。第四系为土黄色松散砂砾石;白垩系中上部为深灰色、灰黑色页岩、灰质泥岩和含灰泥岩,底部为浅灰色含砾



地层与侵入体之间的不整合是指侏罗系、白垩系等新地层不整合在侵入体之上。

图 1　北山地区中生代构造单元划分(a)及研究区地质简图(b)

Fig.1　Tectonic units of Mesozoic in Beishan area (a) and geological sketch map of the study area (b)

不等粒砂岩；石炭系为紫红色、灰绿色安山岩、英安岩和凝灰岩等。

2　样品采集与测试方法

针对 MGD1 井的黑色页岩岩心样品，连续等间距采集了 51 件烃源岩样品、51 件地球化学样品、25 件 X-衍射样品和 8 件孢粉样品，具体采样位置及编号见图 2。烃源岩样品在中国石油大学(北京)国家重点实验室，依据标准《沉积岩中总有机碳测定》(GB/T 19145—2022)[18]，应用 LECO CS230 碳硫分析仪进行测试。地球化学和 X-衍射分析在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室进行分析，主量元素采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定，分析精度优于±2%；微量元素及稀土元素采用电感耦合等离子质谱仪法(ICP-MS)测定，分析精度优于±5%；X-衍射依据标准《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》(SY/T 5163—2018)[19]进行分析。孢粉样品在中国科学院南京地质古生物研究所，采用《化石孢粉分析鉴定》(SY/T 5915—2018)[20]进行鉴定。

3　测试结果

3.1　岩石学特征

MGD1 井黑色页岩物质成分主要由泥质和钙质组成，有少量石英、长石粉屑和碳质。钙质为细小的颗粒状方解石，粒径在 0.005～0.030 mm 之间；粉屑以石英为主，长石少量，粒径在 0.02～0.06 mm 之间；碳质呈细小的尘状，呈弥漫状分布于岩石之中(图 3)。

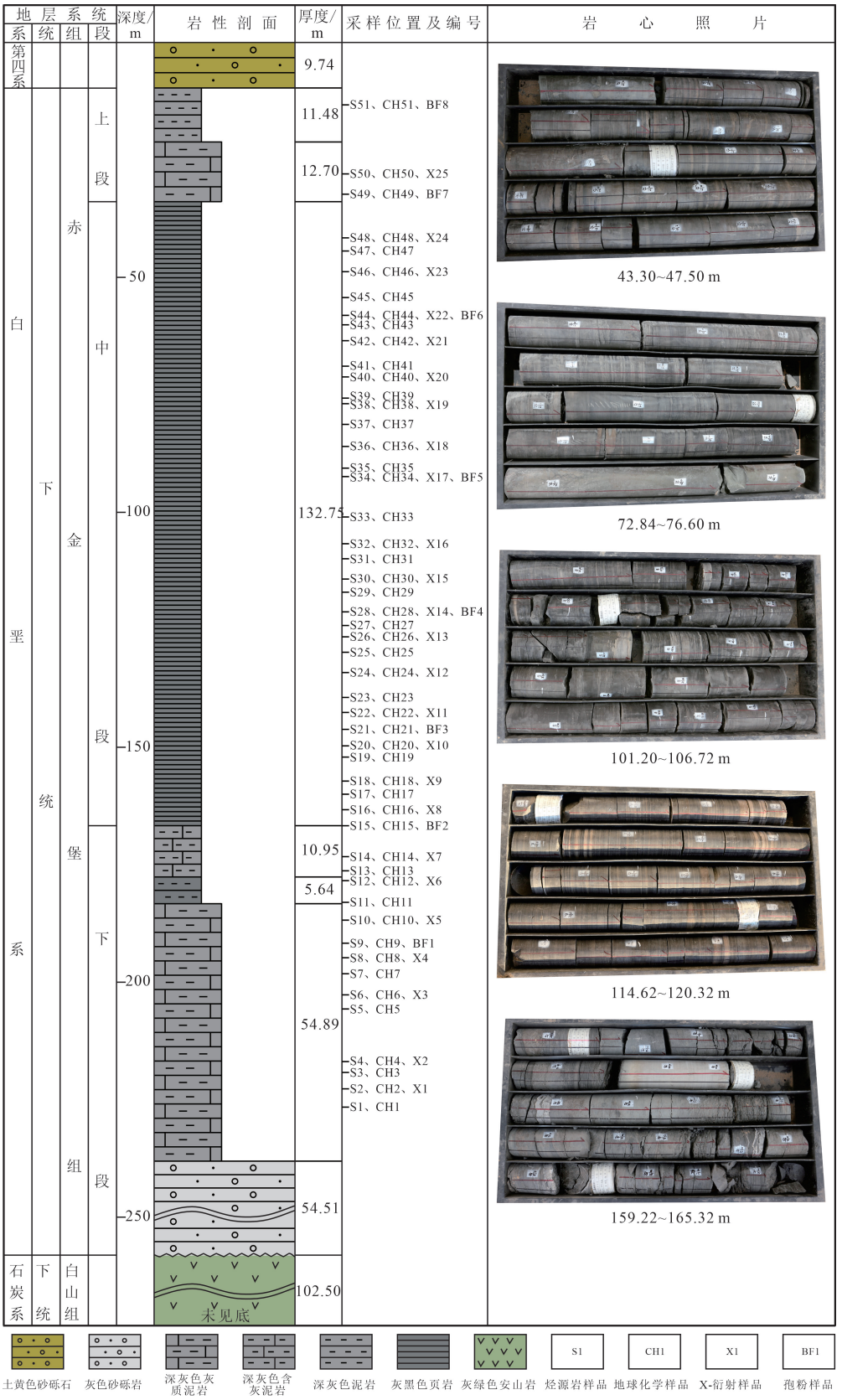
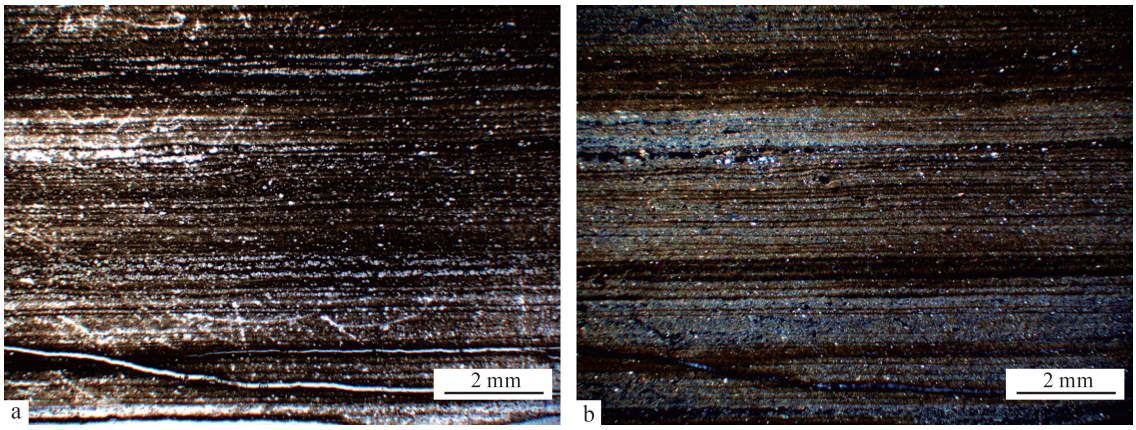


图 2 MGD1 井白垩系综合柱状图及采样位置

Fig.2 Comprehensive column and sampling position of Cretaceous in Well MGD1



a 为单偏光；b 为正交偏光。

图 3　MGD1 井黑色页岩显微照片(109.86 m)

Fig.3　Photomicrograph of black shale in Well MGD1(109.86 m)

全岩 X-衍射分析结果见图 4，MGD1 井黑色页岩矿物成分主要为黏土矿物(27.7%～67.9%，平均值 52.6%)、方解石＋白云石(0.6%～60.5%，平均值 17.1%)、石英(2.1%～25.8%，平均值 15.1%)、斜长石(1.1%～7.9%，平均值 4.7%)和钾长石(0.4%～4.9%，平均值 2.0%)，有少量的方沸石、黄铁矿和萤石。

根据页岩中硅质矿物、黏土矿物和碳酸盐矿物

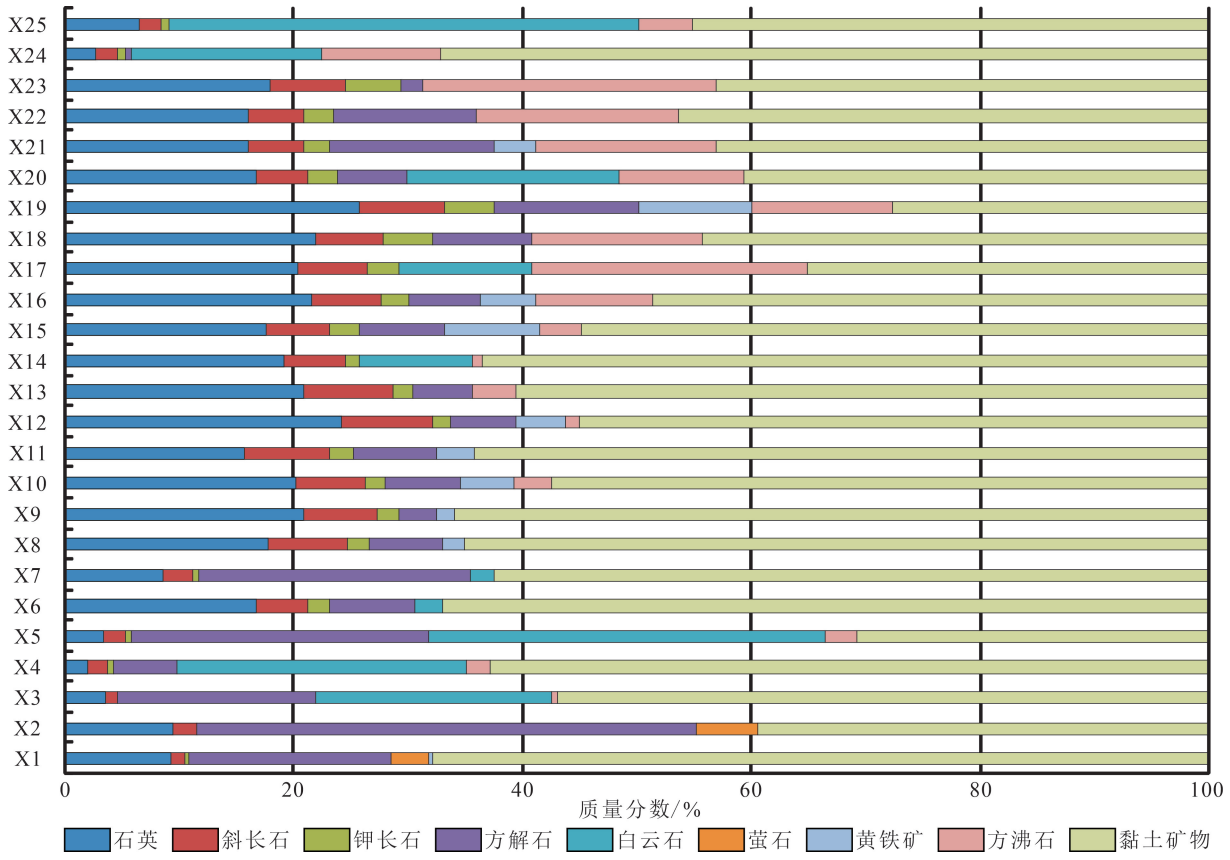


图 4　MGD1 井黑色页岩矿物组分特征

Fig.4　Mineral composition characteristics of black shale in Well MGD1

的质量分数,可以将页岩岩相划分为四大类[21]:硅质页岩、泥质页岩、钙质页岩和混合质页岩。MGD1井白垩系黑色页岩在三元图上主要落于泥质页岩区,少量落于混合质页岩区和钙质页岩区(图5)。

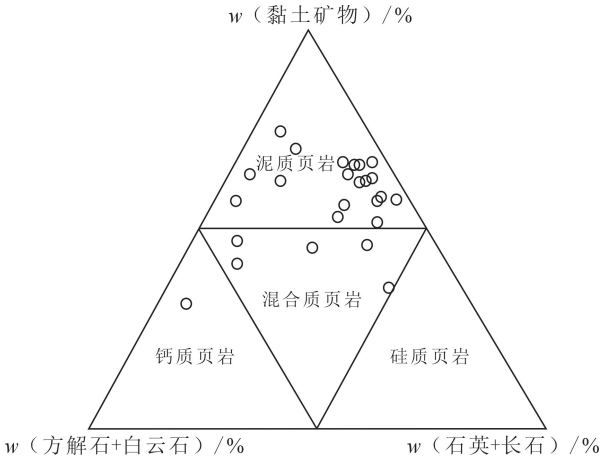


图5 MGD1井黑色页岩岩相划分图

Fig.5 Lithofacies division of black shale in Well MGD1

3.2 地球化学测试结果

MGD1井51件黑色页岩总有机碳质量分数(w(TOC))分布在0.13%~13.20%之间,平均值为3.96%,w(TOC)超过2%的样品36件,平均值为5.37%。黑色页岩w(TOC)在纵向上的总体变化为赤金堡组中段高、下段和上段低,中段w(TOC)平均值为5.40%,下段w(TOC)平均值为1.16%,上段w(TOC)平均值为0.65%(表1),赤金堡组中段为有机质富集的主要层段,w(TOC)主体分布于2%~6%(图6)。

MGD1井黑色页岩SiO_2质量分数为22.72%~53.28%,平均值为41.77%;Al_2O_3质量分数为4.81%~16.61%,平均值为12.78%;TFe_2O_3质量分数为1.86%~18.93%,平均值为6.24%;CaO质量分数为1.87%~35.00%,平均值为9.75%;MgO质量分数为2.16%~12.78%,平均值为5.29%;K_2O质量分数为0.55%~3.79%,平均值为2.57%;Na_2O质量分数为0.62%~4.60%,平均值为2.16%;烧失量为11.69%~32.88%,平均值为18.75%,相对较高,主要是由于样品中有机质和碳酸盐矿物质量分数较高所致;其余TiO_2、P_2O_5、MnO质量分数较低(表1)。

MGD1井黑色页岩Sr质量分数为161×10^{-6}~$1\ 160\times10^{-6}$,平均值为437×10^{-6};Ba质量分数为177×10^{-6}~409×10^{-6},平均值为310×10^{-6};B质量分数为15.0×10^{-6}~138.0×10^{-6},平均值为71.6×10^{-6};Cu质量分数为8.7×10^{-6}~

表1 MGD1井黑色页岩主量元素分析结果

Table 1 Major elements analysis of black shale in Well MGD1

样号	层位	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	烧失量	TOC	I_{CIA}	C
CH1		45.15	7.25	1.37	1.10	13.50	9.53	1.60	1.28	0.37	0.15	0.09	18.47	0.24	55	0.11
CH2		35.48	4.81	0.76	1.30	25.24	10.38	0.71	0.85	0.20	0.21	0.07	19.87	0.15	57	0.06
CH3		32.92	5.28	0.99	1.10	27.31	8.29	0.79	0.76	0.24	0.41	0.09	21.67	1.05	61	0.06
CH4		25.77	5.22	0.86	0.90	33.95	4.04	0.86	0.77	0.26	0.21	0.10	26.86	4.14	60	0.05
CH5		32.02	6.41	1.66	1.30	16.56	12.78	1.23	0.98	0.30	0.06	0.07	26.46	0.52	58	0.11
CH6		24.11	4.95	1.02	1.10	25.10	11.09	0.55	0.77	0.24	0.07	0.07	30.75	0.18	61	0.06
CH7		36.34	10.25	2.49	2.40	11.12	11.11	2.31	2.14	0.48	0.06	0.08	21.07	0.37	52	0.20
CH8	下段	30.30	8.07	1.84	1.90	17.09	10.90	1.77	1.50	0.42	0.09	0.08	25.85	0.37	54	0.13
CH9		22.72	5.06	1.21	1.30	35.00	3.07	0.82	0.62	0.25	0.18	0.11	29.49	0.40	63	0.07
CH10		28.96	7.82	1.50	1.70	20.27	8.59	1.19	1.72	0.38	0.09	0.07	27.52	2.26	53	0.11
CH11		48.22	14.00	3.55	2.40	6.13	5.59	2.52	2.41	0.72	0.21	0.06	14.07	0.72	57	0.38
CH12		46.86	14.09	3.60	2.40	7.49	3.71	2.35	1.42	0.69	0.31	0.07	16.88	3.52	66	0.42
CH13		37.65	10.99	2.57	2.50	17.46	3.64	1.92	1.07	0.56	0.46	0.13	20.90	1.53	66	0.23
CH14		41.35	12.88	3.37	2.60	13.88	3.50	2.35	1.14	0.62	0.18	0.10	17.90	0.74	67	0.30
CH15		27.34	8.64	2.47	2.32	13.55	9.27	1.48	0.86	0.37	0.22	0.37	32.88	13.20	66	0.22

续表 1

样号	层位	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	烧失量	TOC	I_{CIA}	C
CH16		49.89	16.13	4.48	2.80	4.08	3.60	2.81	1.47	0.69	0.11	0.05	13.75	3.02	67	0.63
CH17		52.35	16.60	4.55	2.60	1.87	3.80	2.96	1.61	0.73	0.15	0.06	12.60	2.50	66	0.72
CH18		50.72	15.15	5.11	2.00	3.12	3.57	2.88	1.46	0.68	0.18	0.06	14.92	2.35	66	0.66
CH19		53.28	16.55	3.44	2.95	2.66	3.68	3.05	1.62	0.73	0.16	0.04	11.69	3.64	66	0.61
CH20		50.02	15.56	4.07	2.65	4.62	3.28	3.06	1.93	0.69	0.24	0.07	13.69	2.87	62	0.54
CH21		48.32	15.24	4.21	2.50	5.31	3.77	3.40	1.26	0.68	0.25	0.07	14.83	4.02	66	0.51
CH22		50.14	15.42	4.66	2.30	3.87	3.52	3.25	1.39	0.67	0.20	0.07	14.40	3.98	66	0.59
CH23		49.02	14.91	3.92	2.60	4.89	3.82	3.24	1.39	0.68	0.64	0.07	14.69	5.01	65	0.51
CH24		48.55	15.11	5.31	1.90	4.61	3.27	3.16	1.35	0.66	0.16	0.06	15.75	3.76	66	0.59
CH25		48.96	15.88	4.74	2.30	3.82	3.74	3.66	1.54	0.70	0.15	0.09	14.28	4.80	64	0.57
CH26		45.58	15.15	2.26	3.10	5.61	4.57	3.39	1.78	0.67	0.13	0.09	17.53	4.56	61	0.38
CH27		49.02	16.43	3.74	4.00	2.79	3.35	3.79	2.02	0.71	0.12	0.06	13.85	3.75	60	0.67
CH28		47.94	15.74	2.93	4.25	3.84	3.87	3.60	1.41	0.72	0.13	0.07	15.37	4.44	65	0.60
CH29		48.92	16.61	4.79	2.40	3.00	3.32	3.67	1.67	0.76	0.17	0.04	14.52	4.34	64	0.62
CH30		45.65	14.66	5.91	2.20	5.54	2.81	3.17	2.26	0.66	0.26	0.05	16.70	7.87	57	0.59
CH31		49.40	15.90	2.18	3.65	4.03	3.08	3.46	2.23	0.73	0.16	0.05	15.02	5.56	59	0.48
CH32	中段	46.40	15.66	2.35	3.20	5.28	2.91	3.12	3.15	0.70	0.14	0.07	16.90	4.91	53	0.40
CH33		46.70	15.86	2.08	3.95	4.70	3.31	3.29	3.16	0.70	0.19	0.07	15.87	6.18	53	0.44
CH34		44.65	15.19	3.15	3.60	3.09	3.53	3.30	3.09	0.68	0.10	0.07	19.43	8.05	52	0.54
CH35		42.52	13.92	3.29	3.20	8.40	2.94	2.88	3.06	0.62	0.19	0.07	18.77	11.20	51	0.39
CH36		43.55	14.07	3.03	3.40	7.47	3.13	3.09	2.78	0.64	0.18	0.07	18.47	8.68	53	0.41
CH37		38.96	12.95	2.15	4.10	9.34	4.97	2.83	2.66	0.59	0.11	0.10	21.10	8.13	52	0.34
CH38		42.78	13.69	2.25	3.10	4.69	2.72	2.97	3.30	0.64	0.13	0.05	23.58	12.20	49	0.41
CH39		45.62	15.05	3.46	3.20	6.20	2.85	3.13	3.35	0.67	0.24	0.05	16.06	4.78	51	0.44
CH40		42.12	13.88	2.58	3.65	6.76	4.22	3.13	3.12	0.62	0.12	0.08	19.59	5.40	50	0.39
CH41		40.12	13.01	2.45	3.50	7.06	4.29	2.68	3.12	0.58	0.12	0.08	22.88	5.85	50	0.37
CH42		35.15	12.08	17.04	1.70	7.29	2.16	2.16	3.48	0.54	0.14	0.05	18.10	4.01	47	1.22
CH43		46.06	15.62	4.05	3.20	6.23	3.07	2.69	4.29	0.70	0.23	0.06	13.69	8.49	48	0.46
CH44		42.73	15.24	3.64	3.60	7.79	3.30	2.52	4.18	0.68	0.24	0.06	15.90	2.44	48	0.43
CH45		36.09	11.39	2.18	3.80	11.91	7.24	2.50	2.72	0.54	0.10	0.13	21.26	4.08	49	0.27
CH46		44.17	15.21	3.30	3.70	5.16	4.57	2.64	4.60	0.70	0.10	0.10	15.62	4.75	46	0.44
CH47		43.05	13.34	2.70	3.50	8.80	4.11	2.37	3.82	0.60	0.10	0.08	17.37	4.69	47	0.35
CH48		40.06	14.73	4.72	3.00	7.22	7.61	3.67	3.34	0.58	0.28	0.12	14.53	0.14	50	0.38
CH49		34.31	9.25	2.31	1.80	11.86	11.91	2.13	2.16	0.38	0.10	0.12	23.53	0.93	50	0.16
CH50	上段	31.58	9.88	2.76	1.85	12.47	12.27	2.35	2.25	0.40	0.12	0.11	23.81	0.88	50	0.17
CH51		40.67	14.82	5.10	1.70	8.24	5.92	2.81	3.84	0.69	0.25	0.15	15.68	0.13	49	0.34

注：主量元素质量分数单位为%；总有机碳质量分数单位为%；I_{CIA}为化学蚀变指数，$I_{CIA}=100[Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO^*+Na_2O+K_2O)]$，式中各元素采用摩尔分数，当 $CaO>Na_2O$ 时，$CaO^*=Na_2O$，当 $CaO\leqslant Na_2O$ 时，$CaO^*=CaO$；C 为古气候指数，$C=\Sigma(Fe+Mn+Cr+V+Co+Ni)/\Sigma(Ca+Mg+Sr+Ba+K+Na)$，式中各元素采用质量分数。

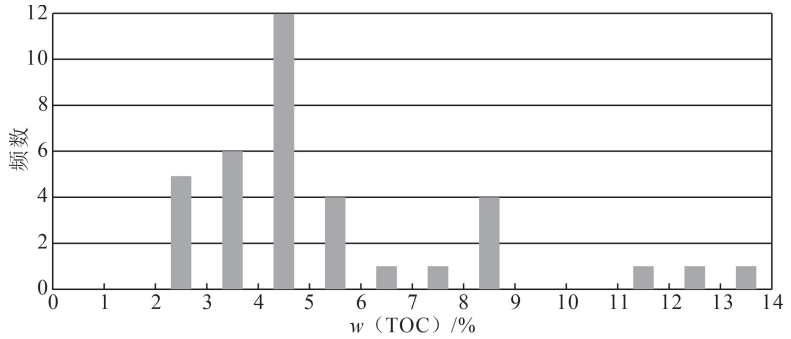


图 6 MGD1 井赤金堡组黑色页岩 w(TOC)分布频数图

Fig.6 w(TOC) distribution frequency of black shale in the Chijinbao Formation, Well MGD1

56.9×10^{-6},平均值为 40.6×10^{-6};Ni 质量分数为 $14.7\times10^{-6}\sim66.5\times10^{-6}$,平均值为 33.7×10^{-6};Co 质量分数为 $5.4\times10^{-6}\sim25.7\times10^{-6}$,平均值为 15.8×10^{-6};V 质量分数为 $27.6\times10^{-6}\sim170.0\times10^{-6}$,平均值为 110.6×10^{-6};U 质量分数为 $2.30\times10^{-6}\sim19.80\times10^{-6}$,平均值为 7.70×10^{-6};Th 质量分数为 $4.1\times10^{-6}\sim24.8\times10^{-6}$,平均值为 15.4×10^{-6};Hf 质量分数为 $0.92\times10^{-6}\sim4.00\times10^{-6}$,平均值为 2.47×10^{-6};Zr 质量分数为 $36.9\times10^{-6}\sim133.0\times10^{-6}$,平均值为 87.0×10^{-6};Sc 质量分数为 $5.1\times10^{-6}\sim19.2\times10^{-6}$,平均值为 13.8×10^{-6}(表 2)。MGD1 井黑色页岩微量元素用北美页岩(NASC)标准化后,Sr、U 元素较北美页岩富集,Ba、B、Ni、Zr 元素较北美页岩亏损,Cu、Co、V、Th、Hf、Sc 元素与北美页岩基本一致(图 7)。

MGD1 井黑色页岩稀土元素总量(ΣREE)为 $59.69\times10^{-6}\sim319.51\times10^{-6}$,平均值为 192.21×10^{-6};轻稀土与重稀土元素比值(LREE/HREE)为 2.45~4.70,平均值为 3.77,相对富集轻稀土元素(表 3)。用北美页岩(NASC)标准化后呈平缓的右倾斜;$(La/Yb)_N$值为 0.87~1.71,平均值为 1.29;$(La/Ce)_N$值为 0.80~1.30,平均值为 1.01;δEu 值为 0.80~1.07,平均值为 0.92,少见 Eu 正异常;δCe 值为 0.79~1.17,平均值为 0.98,Ce 具有轻微的负异常(图 8)。

表 2 MGD1 井黑色页岩微量元素分析结果

Table 2 Trace elements analysis of black shale in Well MGD1

样号	层位	Sr	Ba	B	Cu	Ni	Co	V	U	Th	Hf	Zr	Sc	Sr/Cu	Sr/Ba	h	V/(V+Ni)
CH1		616	345	25.0	24.6	15.6	6.2	41.7	3.17	10.0	2.70	106.0	7.8	25.04	1.79	9.59	0.73
CH2		644	179	15.0	8.7	14.7	5.4	27.6	2.50	4.1	1.15	45.7	5.1	74.11	3.60	9.22	0.65
CH3		793	177	22.0	15.4	16.6	6.7	32.2	6.28	4.2	1.12	49.8	5.3	51.49	4.48	14.24	0.66
CH4		1 160	329	27.6	10.7	17.1	6.6	41.1	6.44	5.9	1.59	70.0	6.6	108.41	3.53	13.07	0.71
CH5		864	302	38.4	13.2	16.0	6.8	46.2	2.30	7.0	1.38	47.2	8.4	65.45	2.86	13.79	0.74
CH6		1 020	240	35.8	9.6	15.2	5.9	33.2	2.87	6.2	0.92	36.9	6.3	105.92	4.25	12.20	0.69
CH7		736	307	78.8	19.5	19.7	10.1	75.7	2.95	9.1	1.38	53.3	12.3	37.74	2.40	21.94	0.79
CH8	下段	936	321	73.9	17.5	16.2	8.2	56.8	3.19	8.1	1.11	57.2	9.2	53.49	2.92	19.29	0.78
CH9		854	298	26.7	16.1	15.8	7.9	38.0	4.43	5.9	1.12	46.0	6.2	53.04	2.87	18.32	0.71
CH10		1 110	317	61.5	15.6	18.2	10.3	71.3	5.99	10.7	1.10	41.3	9.3	71.15	3.50	26.40	0.80
CH11		346	216	76.6	39.6	29.4	16.5	161.0	11.50	17.9	2.41	93.6	17.1	8.74	1.60	57.42	0.85
CH12		387	279	56.6	41.5	31.4	18.9	134.0	14.10	18.6	2.41	87.4	16.7	9.33	1.39	71.81	0.81
CH13		632	236	41.3	46.7	27.5	17.4	139.0	13.30	14.5	2.04	78.9	13.3	13.53	2.68	61.80	0.83
CH14		550	268	45.7	32.0	34.9	17.1	134.0	4.64	17.1	2.65	98.5	15.5	17.19	2.05	58.52	0.79
CH15		728	372	48.9	36.2	26.4	10.3	82.8	19.80	13.4	1.59	57.2	10.2	20.11	1.96	25.56	0.76

续表 2

样号	层位	Sr	Ba	B	Cu	Ni	Co	V	U	Th	Hf	Zr	Sc	Sr/Cu	Sr/Ba	h	V/(V+Ni)
CH16		279	287	62.3	51.7	59.8	23.4	159.0	6.88	19.0	2.71	92.6	18.2	5.40	0.97	103.04	0.73
CH17		273	281	79.5	52.2	42.6	20.6	141.0	4.86	19.7	3.14	109.0	18.3	5.23	0.97	77.88	0.77
CH18		378	332	92.4	56.9	66.5	25.7	167.0	13.60	20.6	2.78	99.3	16.3	6.64	1.14	121.79	0.72
CH19		260	308	88.7	55.4	37.0	18.2	153.0	5.20	20.4	3.17	106.0	17.4	4.69	0.84	59.05	0.81
CH20		251	317	64.7	49.8	45.7	20.7	127.0	9.23	20.5	2.98	94.7	16.2	5.04	0.79	81.50	0.74
CH21		298	262	83.8	51.6	39.1	21.8	145.0	10.80	19.7	2.61	94.5	16.4	5.78	1.14	86.74	0.79
CH22		300	283	76.7	45.4	34.7	18.2	119.0	5.80	20.2	2.61	93.8	16.8	6.61	1.06	64.12	0.77
CH23		333	273	99.8	44.0	31.7	16.7	118.0	9.50	18.0	2.80	94.4	15.0	7.57	1.22	52.20	0.79
CH24		269	284	97.8	48.0	37.9	17.9	127.0	6.62	20.7	2.69	94.5	16.3	5.60	0.95	61.29	0.77
CH25		312	402	104.0	46.0	32.8	17.5	152.0	10.20	19.6	2.96	97.0	16.6	6.78	0.78	57.68	0.82
CH26		317	386	125.0	55.8	35.3	18.4	151.0	16.20	22.1	2.99	100.0	16.6	5.68	0.82	59.02	0.81
CH27		209	325	122.0	55.9	43.0	21.8	143.0	7.48	14.9	3.01	107.0	15.7	3.74	0.64	85.93	0.77
CH28		254	379	138.0	54.6	42.7	20.6	170.0	11.70	17.5	4.00	133.0	16.8	4.65	0.67	77.35	0.80
CH29		231	361	135.0	53.1	40.7	21.1	155.0	8.32	17.5	3.72	122.0	17.0	4.35	0.64	81.44	0.79
CH30		258	382	67.4	52.1	42.4	19.1	112.0	11.90	19.6	3.66	121.0	14.7	4.95	0.68	62.98	0.73
CH31		217	316	98.0	50.9	43.0	19.7	135.0	7.07	17.0	3.54	121.0	16.1	4.26	0.69	69.75	0.76
CH32	中段	215	338	92.4	51.9	31.4	16.1	110.0	6.16	19.1	2.98	108.0	14.9	4.14	0.64	46.45	0.78
CH33		230	317	99.8	54.6	34.8	19.0	121.0	5.96	17.4	3.07	104.0	14.3	4.21	0.73	64.10	0.78
CH34		161	343	84.1	54.9	40.2	20.5	117.0	5.34	12.4	3.01	105.0	14.9	2.93	0.47	83.31	0.74
CH35		296	329	67.6	53.3	39.8	16.8	116.0	7.64	19.6	2.68	91.6	13.2	5.55	0.90	49.66	0.74
CH36		277	339	84.4	51.9	37.9	16.5	127.0	7.64	17.1	3.04	104.0	15.2	5.34	0.82	49.96	0.77
CH37		376	409	58.8	46.4	38.2	17.8	115.0	8.64	18.8	3.06	97.7	15.0	8.10	0.92	57.05	0.75
CH38		197	316	99.6	50.4	36.3	17.3	100.0	5.25	11.0	3.07	101.0	12.8	3.91	0.62	56.22	0.73
CH39		233	347	98.4	53.2	36.9	17.0	135.0	8.35	21.6	3.15	106.0	18.0	4.38	0.67	47.99	0.79
CH40		291	377	68.2	52.9	40.8	18.4	108.0	9.23	19.2	2.82	94.9	14.8	5.50	0.77	58.39	0.73
CH41		249	246	28.3	46.0	40.2	14.5	104.0	8.15	13.5	2.24	82.6	11.3	5.41	1.01	44.39	0.72
CH42		237	255	42.4	43.3	39.4	16.0	87.9	3.74	12.9	2.04	72.0	11.1	5.47	0.93	50.51	0.69
CH43		248	327	59.3	53.0	43.6	19.7	136.0	9.68	19.5	2.63	92.3	17.1	4.68	0.76	68.08	0.76
CH44		297	334	60.4	50.6	40.7	18.6	128.0	10.00	24.8	2.91	96.0	17.7	5.87	0.89	55.69	0.76
CH45		421	337	47.9	35.3	30.4	12.8	97.5	6.89	15.4	2.07	75.7	15.1	11.93	1.25	32.79	0.76
CH46		230	298	67.6	48.7	42.5	19.4	112.0	7.25	11.5	2.57	93.9	15.7	4.72	0.77	72.71	0.72
CH47		365	334	46.2	46.1	35.1	16.5	107.0	11.90	16.6	2.52	83.3	13.9	7.92	1.09	50.71	0.75
CH48		320	322	109.0	36.8	40.8	17.6	143.0	6.81	19.2	2.18	77.7	15.1	8.70	0.99	60.17	0.78
CH49		678	290	64.0	12.0	23.7	10.6	75.1	3.64	6.9	1.78	62.4	10.4	56.50	2.34	26.89	0.76
CH50	上段	705	255	87.9	25.1	24.5	11.2	75.5	6.52	8.1	1.53	51.8	10.3	28.09	2.76	29.31	0.76
CH51		422	332	77.2	33.0	33.2	16.2	138.0	5.34	20.5	2.59	89.0	19.2	12.79	1.27	45.52	0.81

注：微量元素质量分数单位为 10^{-6}。h 为古水深(m)，$h = A / V_s^{3/2}$，$V_s = V_o \times N_{Co}/[(S_{Co}-(S_{La}/N_{La})\times T_{Co}]$，$A$ 为常数(3.05×10^5)，V_s为沉积速率(10^3m/Ma)，V_o为湖相泥岩沉积速率($0.2\sim0.3)\times10^3$m/Ma，N_{Co}为湖泊沉积物中 Co 的质量分数平均值(20×10^{-6})，S_{Co}为样品中 Co 的丰度(10^{-6})，S_{La}为样品中 La 的丰度(10^{-6})，N_{La}为陆源碎屑岩中 La 的平均值(38.99×10^{-6})，T_{Co}为陆源碎屑岩中 Co 的平均值(4.68×10^{-6})。

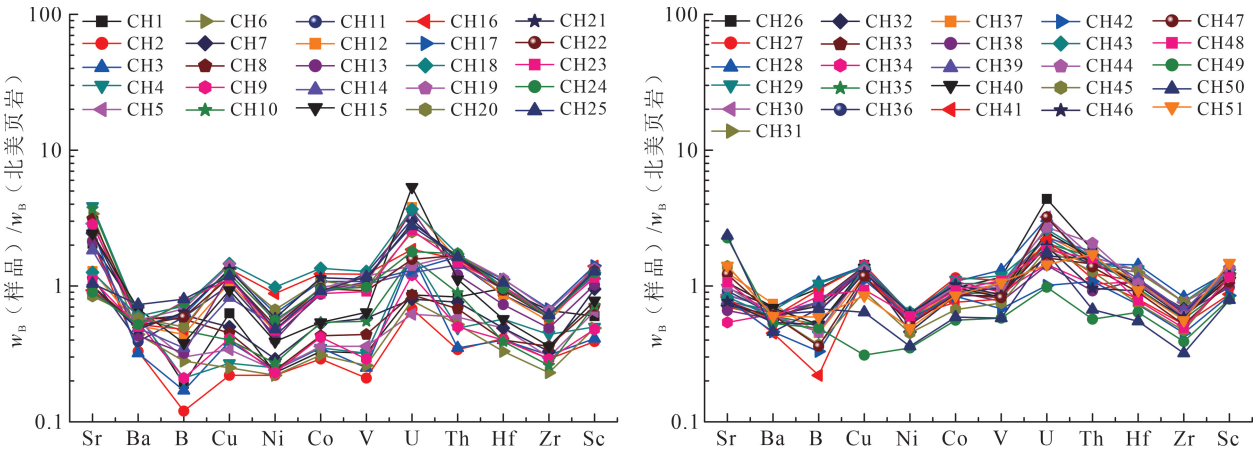


图 7 MGD1 井黑色页岩微量元素北美页岩标准化配分模式图

Fig.7 NASC-normalized trace elements patterns of black shale in Well MGD1

表 3 MGD1 井黑色页岩稀土元素及北美页岩标准化计算结果

Table 3 Rare earth elements analysis and NASC-normalized result of black shale in Well MGD1

样号	层位	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
CH1		18.30	43.90	4.42	18.50	3.31	0.77	3.04	0.64	3.37	0.68	1.84	0.34	1.83
CH2		12.90	22.70	2.96	10.70	2.21	0.46	2.37	0.39	2.10	0.45	1.20	0.18	1.12
CH3		12.70	26.20	2.69	11.50	1.95	0.45	1.78	0.36	1.89	0.35	1.06	0.16	0.93
CH4		14.10	26.20	3.09	12.20	2.27	0.54	2.29	0.40	2.23	0.46	1.37	0.20	1.33
CH5		14.70	29.80	3.43	13.40	2.74	0.50	2.43	0.48	2.42	0.50	1.30	0.20	1.27
CH6		9.92	19.60	2.20	9.20	1.74	0.38	1.63	0.33	1.67	0.33	1.01	0.15	0.97
CH7		26.50	48.10	6.06	23.10	4.05	0.79	3.91	0.62	3.48	0.66	2.00	0.25	1.65
CH8	下段	15.00	33.20	3.76	16.00	2.76	0.55	2.31	0.47	2.37	0.44	1.34	0.19	1.23
CH9		15.20	30.10	3.60	13.60	2.74	0.56	2.48	0.42	2.36	0.44	1.24	0.17	1.14
CH10		20.60	44.20	5.24	20.60	3.89	0.84	3.95	0.62	3.36	0.65	2.08	0.28	2.10
CH11		28.00	71.30	7.58	31.90	5.70	1.27	5.40	0.92	5.12	0.94	2.93	0.38	2.58
CH12		30.40	68.40	8.15	33.60	6.12	1.39	5.76	0.95	5.17	0.92	2.90	0.39	2.84
CH13		30.00	67.30	7.37	31.00	5.27	1.16	4.87	0.87	4.64	0.85	2.58	0.34	2.23
CH14		31.60	72.90	8.44	32.70	6.07	1.30	5.72	0.96	5.20	1.05	3.05	0.43	3.11
CH15		22.00	49.80	5.96	23.20	4.69	0.92	4.55	0.80	4.38	0.92	2.57	0.38	2.44
CH16		33.30	86.20	8.93	33.30	6.17	1.16	5.34	0.93	4.58	0.94	2.47	0.41	2.47
CH17		37.50	91.80	9.62	39.20	6.80	1.30	5.84	1.03	5.69	0.98	3.11	0.42	2.90
CH18		33.40	83.10	8.18	34.00	5.74	1.19	5.01	0.86	4.67	0.86	2.57	0.36	2.43
CH19		40.10	97.10	11.30	41.10	7.87	1.53	6.80	1.13	5.51	1.13	3.14	0.45	3.18
CH20		34.20	93.50	10.30	40.20	8.11	1.34	6.18	1.13	5.40	1.10	2.84	0.44	2.69
CH21	中段	37.50	90.90	9.46	39.50	6.25	1.29	5.86	0.97	5.46	0.94	2.81	0.37	2.50
CH22		33.80	81.40	8.72	36.60	6.24	1.25	5.76	0.96	5.52	0.96	2.79	0.37	2.53
CH23		36.40	83.60	8.60	38.20	6.15	1.28	5.45	1.01	5.66	0.99	2.97	0.45	3.06
CH24		34.80	99.70	9.93	40.70	7.49	1.29	5.85	1.16	5.47	0.98	2.78	0.41	2.41
CH25		36.00	82.00	9.22	35.80	6.44	1.24	5.60	0.97	5.30	0.95	2.78	0.38	2.69
CH26		41.80	105.00	11.30	42.10	7.92	1.40	6.44	1.13	5.65	1.08	2.96	0.44	2.91

续表 3

样号	层位	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
CH27		38.40	86.00	9.05	36.40	5.62	1.19	5.17	0.90	4.73	0.85	2.63	0.35	2.39
CH28		38.10	95.50	10.10	39.10	7.29	1.22	5.69	1.05	5.29	1.02	2.75	0.45	2.65
CH29		37.60	76.60	10.10	34.40	6.78	1.29	6.43	0.98	5.36	1.07	3.08	0.42	3.06
CH30		42.70	97.60	11.80	44.50	8.50	1.64	7.98	1.32	6.92	1.42	4.06	0.57	3.83
CH31		39.50	83.60	10.30	36.90	6.53	1.33	5.92	0.92	5.10	0.96	2.89	0.39	2.97
CH32		39.10	94.30	9.78	38.90	6.89	1.28	5.76	1.00	5.31	0.91	2.75	0.38	2.43
CH33		40.50	88.20	9.91	39.00	5.99	1.22	5.79	0.90	4.96	0.89	2.76	0.34	2.61
CH34		30.50	66.60	7.60	30.70	4.90	1.00	4.07	0.76	3.98	0.73	2.31	0.33	2.16
CH35		40.60	94.60	10.10	41.40	6.91	1.29	6.02	1.09	5.86	1.00	2.94	0.41	2.61
CH36		37.70	90.30	9.45	37.70	6.41	1.29	5.76	1.05	5.37	0.99	3.02	0.42	2.88
CH37	中段	39.30	94.30	10.20	39.90	7.55	1.35	6.11	1.15	5.73	1.08	3.07	0.48	2.98
CH38		36.20	72.30	8.77	29.30	5.61	1.02	5.20	0.78	3.79	0.81	2.14	0.29	2.05
CH39		44.50	109.00	12.60	48.60	9.47	1.63	8.02	1.51	7.18	1.47	3.72	0.56	3.47
CH40		42.60	103.00	11.00	42.40	7.72	1.41	6.20	1.12	5.56	1.04	2.92	0.44	2.72
CH41		28.60	58.10	6.77	27.20	4.83	0.98	4.35	0.68	4.01	0.74	2.34	0.30	2.23
CH42		32.80	76.20	7.88	31.60	5.45	1.03	4.72	0.85	4.15	0.74	2.08	0.29	1.87
CH43		41.50	105.00	12.10	47.40	8.82	1.48	7.54	1.31	6.77	1.30	3.32	0.48	2.99
CH44		47.70	124.00	13.10	52.20	10.00	1.92	8.84	1.65	8.58	1.55	4.34	0.62	3.66
CH45		31.30	73.60	7.84	33.40	5.38	1.20	5.03	0.93	5.02	0.94	2.84	0.38	2.61
CH46		33.50	70.10	8.72	32.50	5.59	1.19	5.41	0.83	4.70	0.86	2.57	0.33	2.48
CH47		36.70	83.70	9.33	38.20	6.10	1.28	5.70	0.99	5.66	0.93	2.95	0.40	2.73
CH48		33.70	61.20	8.52	32.90	5.66	1.19	5.78	0.91	5.11	0.94	2.68	0.35	2.45
CH49		22.30	53.10	5.52	22.70	3.92	0.69	3.44	0.63	3.26	0.56	1.52	0.23	1.30
CH50	上段	23.40	53.00	5.59	23.40	3.94	0.82	3.55	0.67	3.51	0.57	1.70	0.25	1.53
CH51		41.20	89.60	10.60	38.90	7.03	1.42	6.82	1.07	5.70	1.08	3.23	0.40	3.05

样号	层位	Lu	Y	LREE	HREE	ΣREE	LREE/HREE	$(La/Yb)_N$	$(La/Ce)_N$	δEu	δCe	Ce_{anom}
CH1		0.32	18.20	89.20	30.26	119.46	2.95	0.97	0.95	1.07	1.06	0.025
CH2		0.15	13.20	51.93	21.16	73.09	2.45	1.12	1.30	0.88	0.80	−0.083
CH3		0.16	11.80	55.49	18.49	73.98	3.00	1.32	1.11	1.06	0.98	−0.026
CH4		0.20	14.40	58.40	22.88	81.28	2.55	1.03	1.23	1.04	0.86	−0.065
CH5		0.20	15.00	64.57	23.80	88.37	2.71	1.12	1.13	0.85	0.91	−0.034
CH6		0.16	10.40	43.04	16.65	59.69	2.58	0.99	1.15	0.99	0.91	−0.048
CH7		0.22	18.30	108.60	31.09	139.69	3.49	1.56	1.26	0.87	0.83	−0.076
CH8	下段	0.20	14.90	71.27	23.45	94.72	3.04	1.18	1.03	0.96	0.96	−0.018
CH9		0.16	13.50	65.80	21.91	87.71	3.00	1.29	1.15	0.94	0.89	−0.042
CH10		0.29	17.90	95.37	31.23	126.60	3.05	0.95	1.06	0.94	0.93	−0.022
CH11		0.38	23.30	145.75	41.95	187.70	3.47	1.05	0.90	1.01	1.07	0.033
CH12		0.40	23.50	148.06	42.83	190.89	3.46	1.04	1.01	1.03	0.95	−0.016
CH13		0.35	24.30	142.10	41.03	183.13	3.46	1.30	1.02	1.01	0.99	−0.008
CH14		0.42	25.20	153.01	45.14	198.15	3.39	0.98	0.99	0.97	0.97	0.004
CH15		0.34	23.20	106.57	39.58	146.15	2.69	0.87	1.01	0.87	0.95	−0.007

续表3

样号	层位	Lu	Y	LREE	HREE	ΣREE	LREE/HREE	$(La/Yb)_N$	$(La/Ce)_N$	δEu	δCe	Ce_{anom}
CH16		0.38	21.20	169.06	38.72	207.78	4.37	1.31	0.88	0.89	1.09	0.059
CH17		0.43	24.50	186.22	44.90	231.12	4.15	1.25	0.93	0.91	1.05	0.029
CH18		0.38	21.10	165.61	38.24	203.85	4.33	1.33	0.92	0.97	1.10	0.040
CH19		0.43	25.30	199.00	47.07	246.07	4.23	1.22	0.94	0.92	0.99	0.027
CH20		0.42	26.50	187.65	46.70	234.35	4.02	1.23	0.83	0.83	1.09	0.059
CH21		0.39	24.90	184.90	44.20	229.10	4.18	1.45	0.94	0.94	1.05	0.023
CH22		0.38	22.80	168.01	42.07	210.08	3.99	1.29	0.95	0.92	1.03	0.016
CH23		0.48	26.60	174.23	46.67	220.90	3.73	1.15	0.99	0.97	1.03	0.000
CH24		0.39	23.70	193.91	43.15	237.06	4.49	1.40	0.80	0.86	1.17	0.080
CH25		0.39	20.80	170.70	39.86	210.56	4.28	1.30	1.00	0.91	0.98	0.005
CH26		0.43	25.40	209.52	46.44	255.96	4.51	1.39	0.91	0.86	1.05	0.045
CH27		0.37	20.20	176.66	37.59	214.25	4.70	1.56	1.02	0.97	1.00	0.004
CH28		0.41	26.50	191.31	45.81	237.12	4.18	1.39	0.91	0.83	1.06	0.042
CH29		0.42	24.20	166.77	45.02	211.79	3.70	1.19	1.12	0.86	0.86	−0.032
CH30		0.53	32.60	206.74	59.23	265.97	3.49	1.08	1.00	0.87	0.95	−0.001
CH31		0.39	21.90	178.16	41.44	219.60	4.30	1.29	1.08	0.94	0.90	−0.019
CH32	中段	0.37	22.80	190.25	41.71	231.96	4.56	1.56	0.95	0.89	1.05	0.029
CH33		0.36	21.10	184.82	39.71	224.53	4.65	1.50	1.05	0.91	0.96	−0.010
CH34		0.33	19.90	141.30	34.57	175.87	4.09	1.37	1.04	0.98	0.95	−0.016
CH35		0.40	25.40	194.90	45.73	240.63	4.26	1.51	0.98	0.88	1.02	0.011
CH36		0.44	23.90	182.85	43.83	226.68	4.17	1.27	0.95	0.93	1.04	0.026
CH37		0.47	27.60	192.60	48.67	241.27	3.96	1.28	0.95	0.87	1.03	0.024
CH38		0.27	19.70	153.20	35.03	188.23	4.37	1.71	1.14	0.83	0.88	−0.025
CH39		0.52	35.30	225.80	61.75	287.55	3.66	1.24	0.93	0.82	1.00	0.022
CH40		0.41	25.60	208.13	46.01	254.14	4.52	1.52	0.94	0.89	1.04	0.030
CH41		0.31	20.20	126.48	35.16	161.64	3.60	1.24	1.12	0.94	0.91	−0.039
CH42		0.28	20.30	154.96	35.28	190.24	4.39	1.70	0.98	0.89	1.03	0.018
CH43		0.44	31.40	216.30	55.55	271.85	3.89	1.34	0.90	0.80	1.02	0.030
CH44		0.55	40.80	248.92	70.59	319.51	3.53	1.26	0.88	0.90	1.08	0.048
CH45		0.40	25.00	152.72	43.15	195.87	3.54	1.16	0.97	1.01	1.02	0.008
CH46		0.33	21.20	151.60	38.71	190.31	3.92	1.31	1.09	0.95	0.89	−0.029
CH47		0.38	24.30	175.31	44.04	219.35	3.98	1.30	1.00	0.95	0.99	−0.001
CH48		0.33	23.40	143.17	41.95	185.12	3.41	1.33	1.26	0.91	0.79	−0.091
CH49		0.21	16.60	108.23	27.75	135.98	3.90	1.66	0.96	0.82	1.04	0.020
CH50	上段	0.24	17.10	110.15	29.12	139.27	3.78	1.48	1.01	0.96	1.01	0.001
CH51		0.41	25.90	188.75	47.66	236.41	3.96	1.31	1.05	0.90	0.93	−0.008

注:稀土元素质量分数单位为10^{-6}。$\delta Eu=Eu_N/(Sm_N\times Gd_N)^{1/2}$;$\delta Ce=Ce_N/(La_N\times Pr_N)^{1/2}$;$Ce_{anom}$为Ce异常值,$Ce_{anom}=\lg[3Ce_N/(2La_N+Nd_N)]$,$Ce_N$、$La_N$、$Nd_N$分别为元素Ce、La、Nd经北美页岩标准化的值。

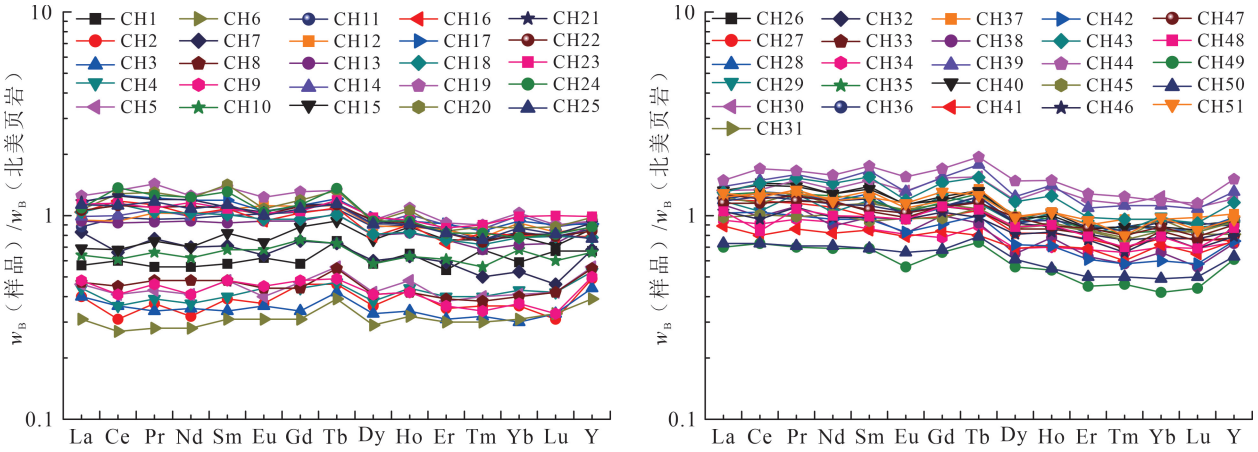


图 8　MGD1 井黑色页岩稀土元素北美页岩标准化配分模式图

Fig.8　NASC-normalized REE patterns of black shale in Well MGD1

4　沉积古环境分析

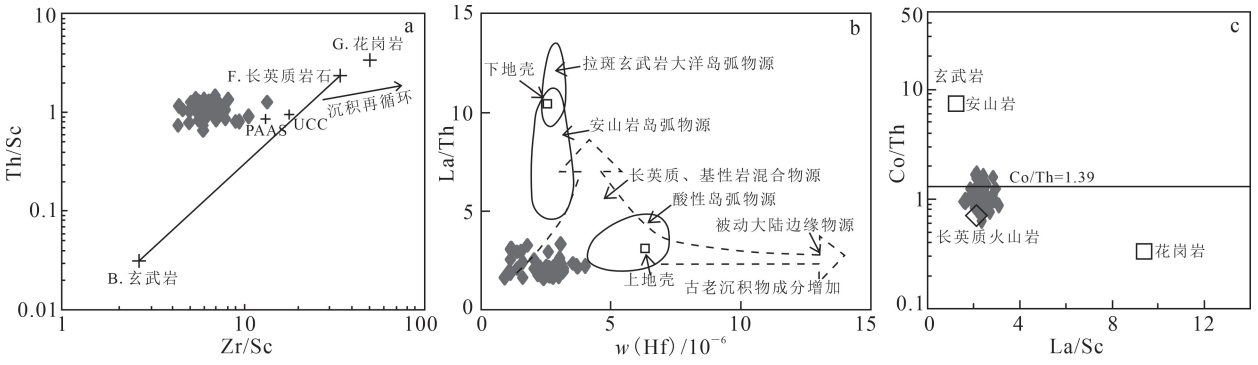
4.1　样品有效性

沉积岩的成分主要取决于源区母岩，但源区化学风化作用和后期热液作用等对泥岩的成分会产生影响[22-24]。

Zr 元素稳定性很强，在沉积分选与再循环过程中会在沉积物中富集[24]，一般 Th 元素赋存于酸性岩中，Sc 元素赋存于基性岩中。Th/Sc 值在沉积再循环过程中一般不会发生变化，而 Zr/Sc 值随沉积再循环过程中锆石的富集而增大。因此，利用 Th/Sc 和 Zr/Sc 可以反映沉积物的分选程度与再循环[25-26]。MGD1 井黑色页岩在 Th/Sc－Zr/Sc 图上（图 9a）靠近成分演化线（BFG），集中分布于后太古宙澳大利亚页岩附近，说明黑色页岩成分受源岩控制，没有经历沉积再循环，为近源沉积。通常利用 La/Th－w(Hf)和 Co/Th－La/Sc 图解（图 9b、c）来判断沉积物的源岩[27-28]。MGD1 井黑色页岩集中分布于长英质火山岩区，说明其物源主要为长英质岩石，且为单一物源，这与研究区前中生代发育的火山岩岩性一致。

根据泥岩的化学成分可以推断源区的风化作用，Nesbitt 等[29]提出利用化学蚀变指数判断源区的风化程度，一般认为：源区经历低等化学风化作用时 $I_{CIA}=50\sim65$；源区经历中等化学风化作用时 $I_{CIA}=65\sim85$；源区经历强烈化学风化作用时 $I_{CIA}=85\sim100$。MGD1 井黑色页岩的 $I_{CIA}=46\sim67$，平均值为 57（表 1），指示物源区为低等化学风化作用。

通常认为构造稳定区富集轻稀土，而构造活跃区则贫轻稀土[30]。MGD1 井黑色页岩 LREE/HREE 为 2.45～4.70，平均值为 3.77，相对富集轻稀土（表3），指示早白垩世时扎格高脑盆地为稳定沉



PAAS.后太古宙澳大利亚页岩；UCC.大陆上地壳。

图 9　MGD1 井黑色页岩沉积分选与再循环、源岩判别图

Fig.9　Sedimentary sorting and recycling, provenance of black shale in Well MGD1

降的湖盆环境。同时MGD1井黑色页岩δEu值为0.80～1.07,平均值为0.92(表3,图8),少见正异常,说明后期也未受热液作用的影响。

MGD1井黑色页岩的物源主要为长英质岩石,且为近源沉积,没有经历沉积再循环,物源经历低等化学风化作用,沉积时为稳定沉降的湖盆环境,沉积后也未受热液作用影响,因此可以利用其地球化学数据进行古环境的分析。

4.2 古气候

Sr为喜干型元素,Cu为喜湿型元素,Sr/Cu值可以灵敏地反映气候的变化,一般认为Sr/Cu<10指示温湿气候,Sr/Cu≥10指示干热气候[3]。另外也常利用古气候指数反映古气候条件[31],原理为不同的气候条件下元素的迁移富集规律不同,Ca、Mg等元素在干燥的气候条件下易于富集,而Fe、Mn等元素在潮湿的气候条件下易于富集。通常认为C<0.1为干燥型气候,0.1≤C<0.2为半干燥型气候,0.2≤C<0.4为半潮湿型气候,C≥0.4为潮湿型气候。

MGD1井白垩系黑色页岩下段Sr/Cu值为8.74～108.41,平均值为47.65,C值为0.05～0.42,平均值为0.17;中段Sr/Cu值为2.93～11.93,平均值为5.63,C值为0.27～1.22,平均值为0.51;上段Sr/Cu值为12.79～56.50,平均值为32.46,C值为0.16～0.34,平均值为0.23(表1、表2);根据各段Sr/Cu值、C值的大小,结合岩性组合特征及区域地质背景,综合分析认为白垩系黑色页岩下段和上段沉积时主体为干热型气候,中段沉积时为温湿型气候(图10)。

4.3 古盐度

沉积物中Sr/Ba值与古盐度呈明显正相关性,可以用来判断沉积水体的古盐度[32]。通常认为,Sr/Ba<0.6时为淡水沉积,0.6≤Sr/Ba<1时为半咸水沉积,Sr/Ba≥1时为咸水沉积[33]。同时根据Ba元素与Sr元素的相关性,利用w(Ba)-w(Sr)图解也可以判断沉积水体的古盐度[34]。

B元素常被作为反映盐度的指标,Walker等[35-36]提出利用"校正硼"和"相当硼"质量分数来反映古盐度。w(校正硼)=8.5w(B)/ w(K_2O),w(相当硼)= 11.8w(校正硼)/[1.70(11.8 − w(K_2O))]。另外,利用B元素还可以定量计算古盐度,常用的有Adamas和Couch公式[37-39]。MGD1井白垩系黑色页岩黏土矿物质量分数较高,主要为伊利石、蒙脱石和绿泥石,利用Couch公式计算古盐度较为符合实际情况。相当硼及古盐度判别指标见表4。MGD1井白垩系黑色页岩下段Sr/Ba值为1.39～4.48,平均值为2.79(表2);w(相当硼)为90.38×10^{-6}～341.37×10^{-6},平均值为182.88×10^{-6};古盐度为3.68‰～10.16‰,平均值为6.98‰(表5)。中段Sr/Ba值为0.47～1.25,平均值为0.86(表2),w(相当硼)为68.31×10^{-6}～275.81×10^{-6},平均值为181.36×10^{-6};古盐度为6.78‰～15.34‰,平均值为11.08‰(表5)。上段Sr/Ba值为1.27～2.76,平均值为2.12(表2),w(相当硼)为180.30×10^{-6}～233.53×10^{-6},平均值为199.05×10^{-6};古盐度只有一个样品,为12.50‰(表5)。

根据Sr/Ba值以及w(Ba)-w(Sr)古盐度图(图11)、相当硼质量分数、古盐度,并结合岩性、孢粉、古气候等资料,综合分析认为白垩系黑色页岩下段和上段为咸水沉积,中段主体为半咸水沉积(图10)。

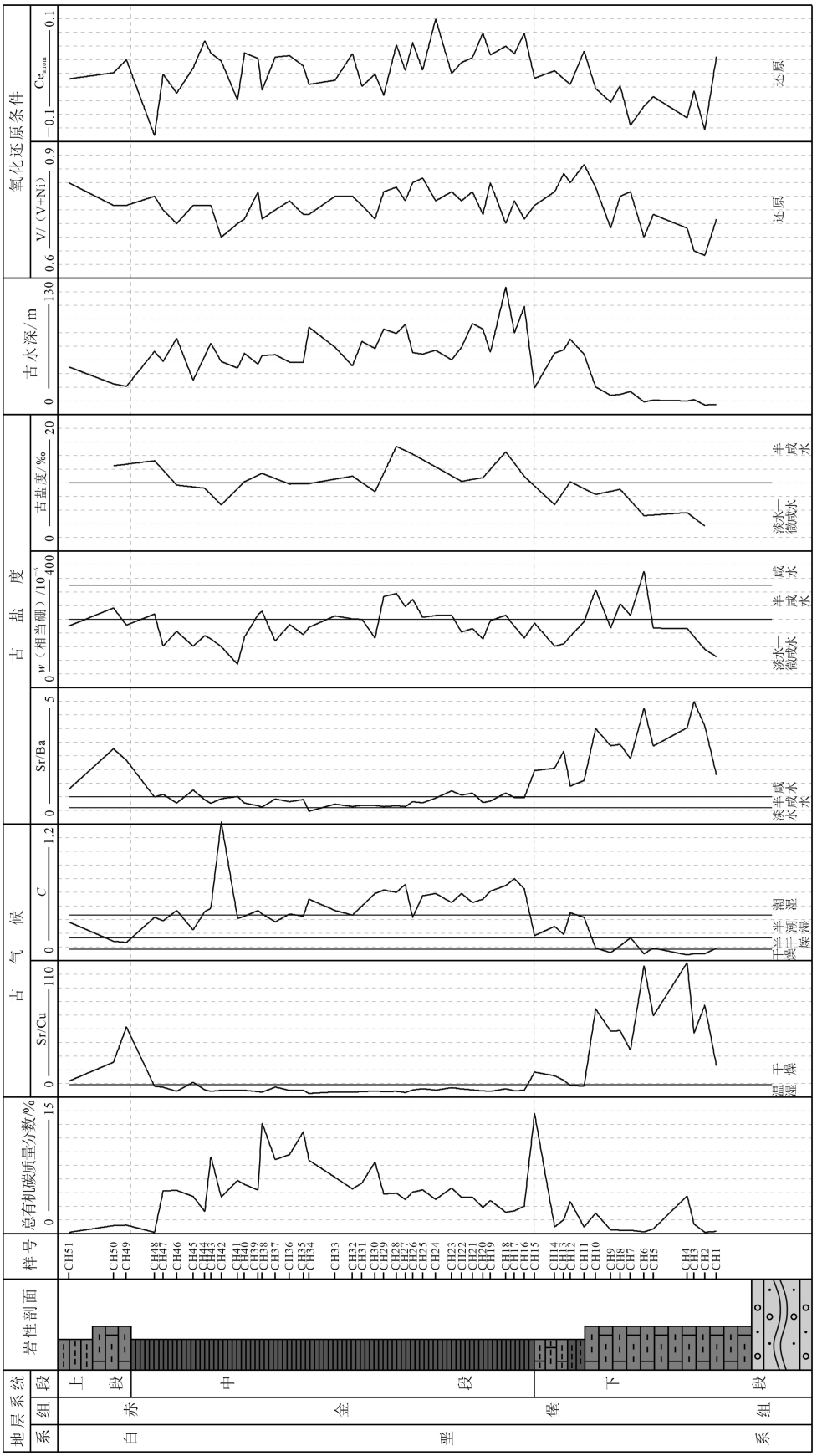
4.4 古水深

周洪瑞等[40]和吴智平等[41]提出定量计算最大古水深的方法,比传统定性推测的优点在于能分辨古水深在纵向上的变化情况,多位学者[3,42]利用此方法定量恢复了鄂尔多斯盆地纸坊组、延长组的古水深。根据Co的测试结果:MGD1井白垩系黑色页岩下段沉积时的古水深为9.22～71.81 m,平均值为28.88 m;中段沉积时的古水深为32.79～121.79 m,平均值为65.15 m;上段沉积时的古水深为26.89～45.52 m,平均值为33.91 m(表2)。总体白垩系下段古水深呈现振荡上升,中段保持高位震荡,上段略有下降(图10)。这与根据岩性组合特征反映的沉积相基本一致,下段和上段岩性为深灰色含灰泥岩、灰质泥岩,中段岩性为灰黑色页岩,说明下段和上段为滨浅湖相,中段为半深湖—深湖相。

4.5 氧化还原条件

沉积水体的氧化还原条件控制着元素在水体中的分异和富集,运用相关元素的质量分数及其比值可定性恢复水介质的氧化还原条件[43-46]。

Hatch等[47]和Jones等[48]指出,根据V/(V+Ni)值可判别氧化还原条件:V/(V+Ni)<0.46代表氧化环境,V/(V+Ni)≥0.46指示还原环境。同时,稀土元素的Ce_{anom}也能灵敏地反映沉积环境的



岩性图例同图 2。

图 10　MGD1 井黑色页岩地球化学古环境判别图

Fig.10　Geochemical paleoenvironment recognition of black shale in Well MGD1

表4 古盐度判别指标[36,39]

Table 4 Discriminant index of paleosalinity

	w(相当硼)/10^{-6}	古盐度/‰
淡水—微咸水	<200	<10
半咸水	200～300	10～25
咸水	300～400	25～35
超咸水	≥400	≥35

氧化还原条件[49],Ce_{anom}<−0.1反映水体呈氧化环境,Ce_{anom}≥−0.1反映水体呈还原环境。

MGD1井白垩系黑色页岩V/(V+Ni)值为0.65～0.85(全部大于0.46),平均值为0.76(表2,图10),Ce_{anom}值为−0.091～0.080(全部大于−0.1),平均值为0.001(表3,图10),均指示其沉积时为还原环境。

表5 MGD1井黑色页岩黏土矿物质量分数及古盐度计算结果

Table 5 Clay mineral content and paleosalinity of black shale in Well MGD1

样号	层位	w(B)/10^{-6}	w(K_2O)/%	w(校正硼)/10^{-6}	w(相当硼)/10^{-6}	黏土矿物相对质量分数/%					校正黏土矿物质量分数/%			w(B′)/10^{-6}	Couch古盐度/‰
						S	I/S	I	C	C/S	I	S	C		
CH1		25.0	1.60	132.81	90.38										
CH2		15.0	0.71	179.58	112.40	90		10			10.0	90.0	0.0	6.82	3.68
CH3		22.0	0.79	236.71	149.23										
CH4		27.6	0.86	272.79	173.08	80		18	2		18.0	80.0	2.0	11.79	5.64
CH5		38.4	1.23	265.37	174.26										
CH6		35.8	0.55	553.27	341.37		71(40)	27	2		69.6	28.4	2.0	10.62	5.20
CH7		78.8	2.31	289.96	212.08										
CH8	下段	73.9	1.77	354.89	245.60		69(40)	30	1		71.4	27.6	1.0	21.62	9.06
CH9		26.7	0.82	276.77	174.96										
CH10		61.5	1.19	439.29	287.39		72(55)	27	1		59.4	39.6	1.0	19.35	8.30
CH11		76.6	2.52	258.37	193.26										
CH12		56.6	2.35	204.72	150.37	78		16	6		16.0	78.0	6.0	25.04	10.16
CH13		41.3	1.92	182.84	128.45										
CH14		45.7	2.35	165.30	121.41		74(50)	19	7		56.0	37.0	7.0	14.98	6.80
CH15		48.9	1.48	280.84	188.89										
CH16		62.3	2.81	188.45	145.50	78		16	6		16.0	78.0	6.0	27.57	10.95
CH17		79.5	2.96	228.29	179.26										
CH18		92.4	2.88	272.71	212.21	73		20	7		20.0	73.0	7.0	39.66	14.55
CH19		88.7	3.05	247.20	196.10										
CH20		64.7	3.06	179.72	142.73	71		23	6		23.0	71.0	6.0	26.96	10.76
CH21		83.8	3.40	209.50	173.12										
CH22	中段	76.7	3.25	200.60	162.85		74(55)	21	5		54.3	40.7	5.0	25.26	10.23
CH23		99.8	3.24	261.82	212.31										
CH24		97.8	3.16	263.07	211.34		73(55)	22	5		54.9	40.2	5.0	32.10	12.33
CH25		104.0	3.66	241.53	205.96										
CH26		125.0	3.39	313.42	258.68		64(45)	30	6		65.2	28.8	6.0	38.53	14.22
CH27		122.0	3.79	273.61	237.10										
CH28		138.0	3.60	325.83	275.81		63(50)	33	4		64.5	31.5	4.0	42.46	15.34
CH29		135.0	3.67	312.67	266.95										

续表 5

样号	层位	$w(B)/10^{-6}$	$w(K_2O)/\%$	w(校正硼)/10^{-6}	w(相当硼)/10^{-6}	黏土矿物相对质量分数/%					校正黏土矿物质量分数/%			$w(B')/10^{-6}$	Couch 古盐度/‰
						S	I/S	I	C	C/S	I	S	C		
CH30		67.4	3.17	180.73	145.36		61(50)	35	4		65.5	30.5	4.0	20.61	8.72
CH31		98.0	3.46	240.75	200.37										
CH32		92.4	3.12	251.73	201.30		57(40)	36	7		70.2	22.8	7.0	27.71	10.99
CH33		99.8	3.29	257.84	210.31										
CH34		84.1	3.30	216.62	176.89		53(10)	32	7	8(40)	79.7	8.5	11.8	24.19	9.89
CH35		67.6	2.88	199.51	155.25										
CH36		84.4	3.09	232.17	185.02		61(10)	25	4	10(55)	79.9	11.6	8.5	24.03	9.83
CH37		58.8	2.83	176.61	136.66										
CH38		99.6	2.97	285.05	224.08		51(10)	32	9	8(60)	77.9	9.9	12.2	28.99	11.39
CH39	中段	98.4	3.13	267.22	213.94										
CH40		68.2	3.13	185.21	148.28	58		38	4		38.0	58.0	4.0	25.07	10.17
CH41		28.3	2.68	89.76	68.31										
CH42		42.4	2.16	166.85	120.14	55		43	2		43.0	55.0	2.0	14.93	6.78
CH43		59.3	2.69	187.38	142.77										
CH44		60.4	2.52	203.73	152.38	59		38	3		38.0	59.0	3.0	22.12	9.22
CH45		47.9	2.50	162.86	121.55										
CH46		67.6	2.64	217.65	164.93	49		46	5		46.0	49.0	5.0	23.55	9.68
CH47		46.2	2.37	165.70	121.96										
CH48		109.0	3.67	252.45	215.54	42		56	2		56.0	42.0	2.0	35.16	13.24
CH49		64.0	2.13	255.40	183.33										
CH50	上段	87.9	2.35	317.94	233.53	64		35	1		35.0	64.0	1.0	32.68	12.50
CH51		77.2	2.81	233.52	180.30										

注：I.伊利石；S.蒙脱石；C.绿泥石；I/S.伊/蒙混层；C/S.绿/蒙混层；()中数字为混层比；B′.Couch 校正硼。

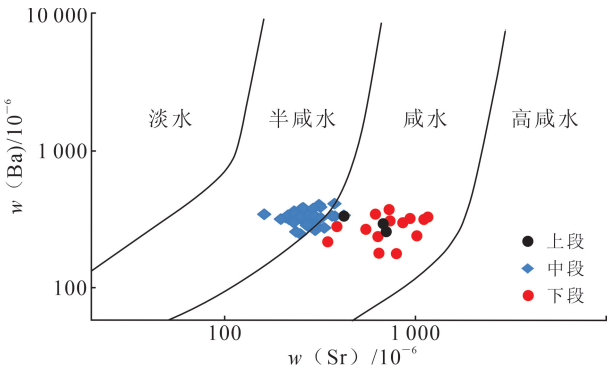


图 11　MGD1 井黑色页岩 $w(Ba)-w(Sr)$ 古盐度图

Fig.11　$w(Ba)-w(Sr)$ paleosalinity of black shale in Well MGD1

4.6　沉积环境的古生物学证据

生物与环境是互为影响，互为制约的。常用孢粉植被法，即依据孢粉谱和孢粉母体植物的生态特征，定量地恢复重建某一地史时期的植被类型、气温带类型和干湿度类型[50-52]。

根据 MGD1 井孢粉鉴定结果（图版Ⅰ），应用孢粉植被法，对北山地区扎格高脑盆地早白垩世时期的植被类型、气温带类型、干湿度类型进行了定量重建（表 6）。结果显示：研究区白垩纪早期（下段下部）植被中针叶林占 38.80%、常绿阔叶林占 34.70%、灌木占 14.51%、草本占 11.99%，显示植被类型为针叶林、常绿阔叶林；植被中热带植物占 49.53%、温带植物占23.97%、热带—亚热带植物占

表6 MGD1井早白垩世孢粉植被、气温带和干湿度类型划分

Table 6 Classification of sporopollen vegetation, temperature zones and moisture types of Early Cretaceous in Well MGD1

样号	植被类型孢粉颗粒分数/%				
	针叶	常绿阔叶	草本	灌木	植被类型划分
BF1	38.80	34.70	11.99	14.51	针叶、常绿阔叶
BF2	84.90	8.33	4.69	2.08	针叶
BF3	91.03	7.64	1.00	0.33	针叶
BF4	95.74	2.39	1.33	0.53	针叶
BF5	94.79	5.21	0	0	针叶
BF6	93.56	3.87	2.06	0.52	针叶
BF7	81.67	5.00	10.00	3.33	针叶
BF8	93.15	2.74	2.74	1.37	针叶

样号	气温带类型孢粉颗粒分数/%					
	热带	热带—亚热带	亚热带	热带—温带	温带	气温带类型划分
BF1	49.53	13.56	0.32	12.62	23.97	热带
BF2	14.06	10.94	0.52	57.29	17.19	热带—温带
BF3	7.31	3.65	1.00	36.21	51.83	温带
BF4	3.19	2.13	0.27	30.05	64.36	温带
BF5	5.21	7.29	1.04	26.04	60.42	温带
BF6	1.29	5.15	0.52	29.64	63.4	温带
BF7	6.67	5.00	1.67	26.67	60.00	温带
BF8	5.48	5.48	0	24.66	64.38	温带

样号	干湿度类型孢粉颗粒分数/%				
	旱生	中生	湿生	沼生	干湿度类型划分
BF1	41.32	12.30	43.85	2.52	旱生、湿生
BF2	18.75	57.29	20.83	3.13	中生
BF3	6.64	41.20	51.50	0.66	湿生
BF4	1.06	43.88	54.52	0.53	湿生
BF5	6.25	47.92	45.83	0	湿生
BF6	1.03	46.65	51.03	1.29	湿生
BF7	3.33	31.67	56.67	8.33	湿生
BF8	4.11	34.25	58.90	2.74	湿生

13.56%、热带—温带植物占12.62%,其气温带属于热带;植被中湿生植物占43.85%、旱生植物占41.32%、中生植物占12.30%,说明当时为半干旱半湿润气候。早期—中期(下段顶部)植被中针叶林占84.90%、常绿阔叶林占8.33%,显示植被类型为针叶林;植被中热带—温带植物占57.29%、温带植物占17.19%、热带植物占14.06%、热带—亚热带植物占10.94%,其气温带属于热带—温带;植被中中生植物占57.29%、湿生植物占20.83%、旱生植物占18.75%,说明当时为半干旱半湿润气候。中晚期(中段—上段)植被中针叶林占81.67%～95.74%、常绿阔叶林占2.39%～7.64%,显示植被类型为针叶林;植被中温带植物占51.83%～64.38%、热带—温带植物占24.66%～36.21%、热带—亚热带植物占2.13%～7.29%、热带植物占1.29%～7.31%,其气温带属于温带;植被中湿生植物占45.83%～58.90%、中生植物占31.67%～47.92%、旱生植物占1.03%～6.64%,说明当时为湿润气候。孢粉反映的古气候特征与地球化学反映的古气候变化趋势基本一致。

5 沉积古环境与油气地质条件

黑色页岩有机质富集受构造背景、热液活动、沉积环境和陆源输入等多方面的影响。前述早白垩世时扎格高脑盆地为稳定沉降的湖盆环境,且沉积后也未受热液作用影响,同时有机碳质量分数与陆源碎屑Al、Ti、Th和Zr元素之间的相关性较小(图12),因此有机质富集主要受沉积环境的影响。

MGD1井51件黑色页岩样品w(TOC)为0.13%～13.20%,平均值为3.96%(表1),达到好烃源岩的标准。通过有机碳质量分数与沉积环境的相关性研究表明,MGD1井黑色页岩有机碳与古气候指数的相关系数为0.293(图13a)、与古盐度的相关系数为0.195(图13b)、与古水深的相关系数为0.257(图13c)、与氧化还原条件(Ce_{anom})的相关系数为0.184(图13d)。虽然有机碳质量分数与沉积环境各因素的相关系数较小,但均为正相关性。从图13a可以看出,古气候指数大于0.4时,有机碳质量分数均大于2%,说明温暖、潮湿的气候条件,可以促进微生物的繁殖、增加水体的古生产力;从图13c可以看出,古水深介于40～90 m之间时,有机碳质量分数相对较高;同时半咸水和还原环境为有机质提供了良好的保存条件(图13b、d)。研究区黑色页岩有机质富集是古气候、古盐度、古水深和氧化还原条件等因素共同耦合的结果。

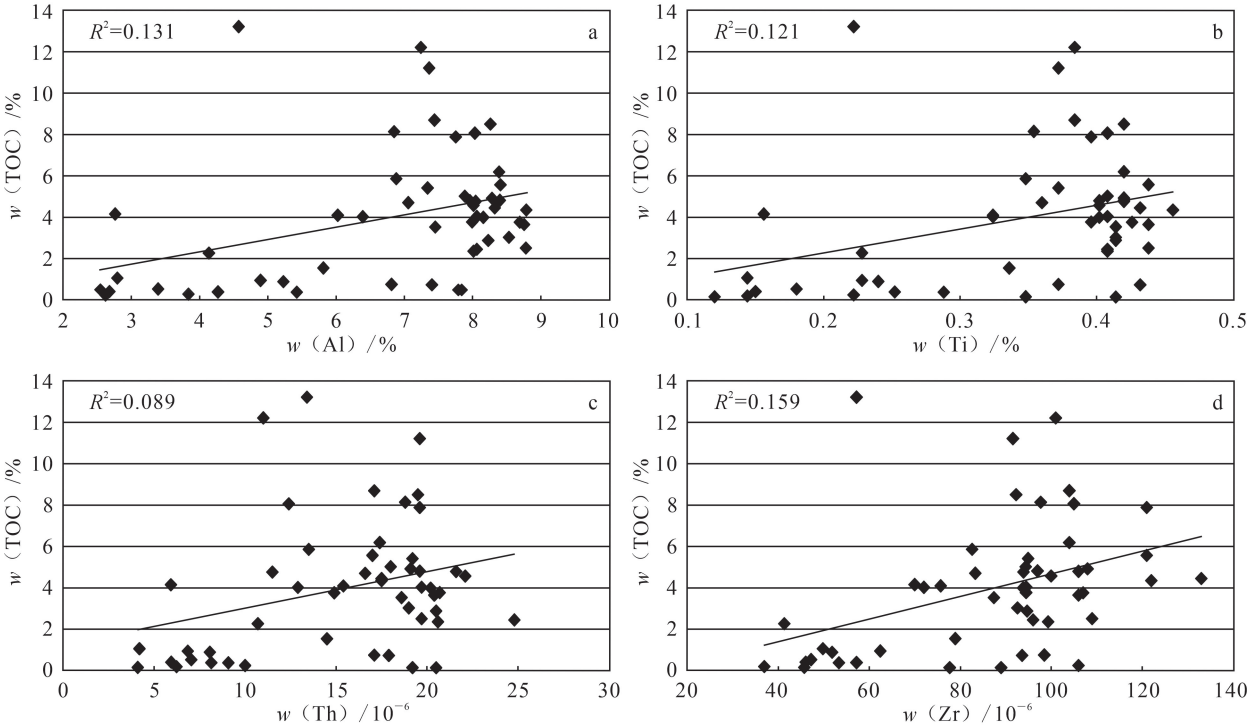


图 12　MGD1 井黑色页岩总有机碳质量分数与陆源碎屑（Al、Ti、Th、Zr）相关性

Fig.12　Correlation between total organic carbon content of black shale and terrigenous detritus (Al, Ti, Th, Zr) in Well MGD1

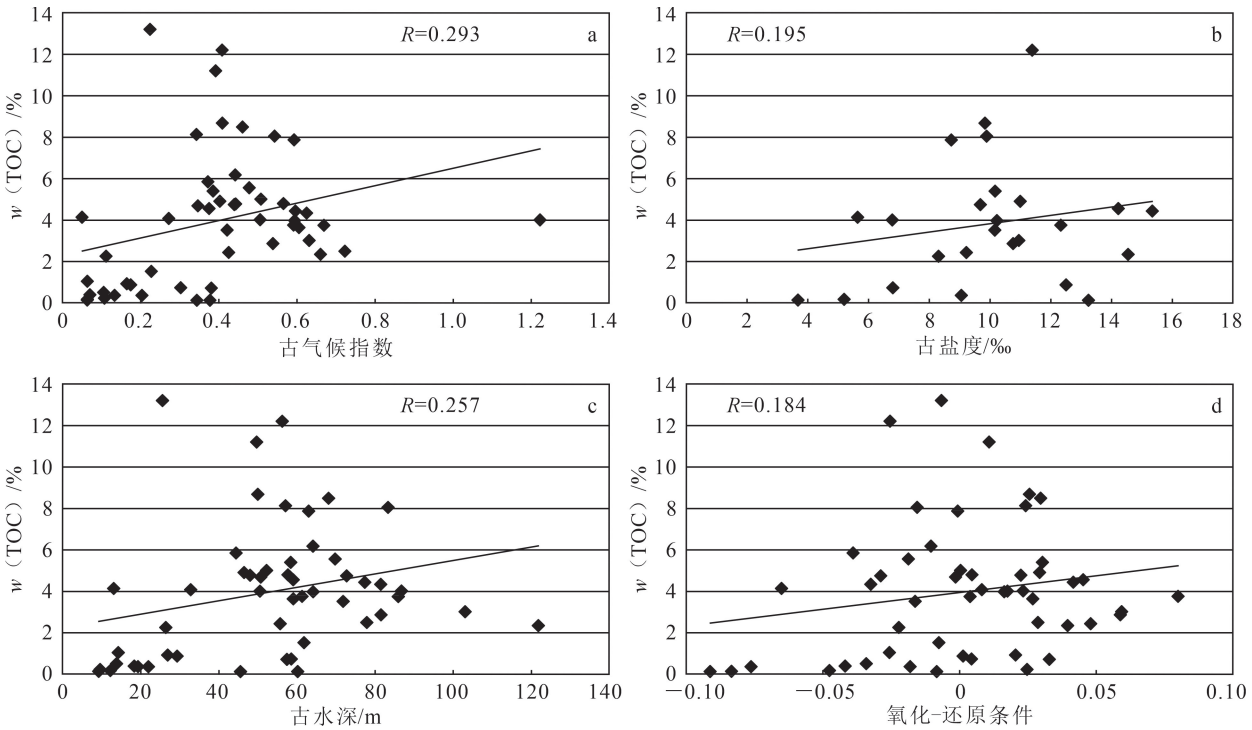


图 13　MGD1 井黑色页岩总有机碳质量分数与沉积环境的相关性

Fig.13　Correlation between total organic carbon content of black shale and sedimentary environment in Well MGD1

6 结论

1)MGD1井白垩系黑色页岩主要为泥质页岩,其物源主要为长英质岩石,且为近源沉积,没有经历沉积再循环,沉积时为稳定沉降的湖盆环境,后期未受热液作用影响,可以利用其地球化学数据进行古环境的分析。

2)MGD1井白垩系黑色页岩下段沉积于干热、咸水、还原的环境,古水深呈现振荡上升;中段沉积于温暖潮湿、半咸水、还原的环境,古水深保持高位震荡;上段沉积于干热、咸水、还原的环境,古水深略有下降。

3)有机碳质量分数与沉积环境的相关性研究表明,MGD1井白垩系黑色页岩沉积时,温暖、潮湿的气候条件可以增加水体的古生产力,同时半咸水和还原环境为有机质提供了良好的保存条件。

致谢:孢粉化石由中国科学院南京地质古生物研究所季兴开研究员鉴定,在此表示衷心感谢!

参考文献(References):

[1] Horan M F, Morgan J W, Grauch R I, et al. Rhenium and Osmium Isotopes in Black Shales and Ni-Mo-PGE-Rich Sulfide Layers, Yukon Territory, Canda, and Hunan and Guizhou Province, China[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1994, 58: 257-265.

[2] 史冀忠,崔海峰,许伟,等.银额盆地巴隆乌拉白垩系巴音戈壁组黑色页岩沉积环境及有机质富集模式[J].地质通报,2022,41(8):1430-1444.
Shi Jizhong, Cui Haifeng, Xu Wei, et al. Sedimentary Environment and Organic Matter Enrichment Model of Black Shale from Cretaceous Bayingebi Formation in Balongwula, Yingen-Ejin Banner Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(8): 1430-1444.

[3] 王峰,刘玄春,邓秀芹,等.鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J].沉积学报,2017,35(6):1265-1273.
Wang Feng, Liu Xuanchun, Deng Xiuqin, et al. Geochemical Characteristics and Environmental Implications of Trace Elements of Zhifang Formation in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(6): 1265-1273.

[4] 李继东,付玉鑫,蒋飞虎,等.银额盆地下白垩统巴音戈壁组泥岩地球化学特征及其古环境意义[J].河南理工大学学报(自然科学版),2022,41(3):48-57.
Li Jidong, Fu Yuxin, Jiang Feihu, et al. Geochemical Characteristics and Their Paleoenvironmental Significance of the Mudstones from the Lower Cretaceous Bayingebi Formation in the Yin'e Basin[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2022, 41(3): 48-57.

[5] 郭奕浩,曾德铭,张芮,等.川中—川东地区侏罗系大安寨段古环境及油气地质意义[J].沉积学报,2024,42(3):1016-1031.
Guo Yihao, Zeng Deming, Zhang Rui, et al. Paleoenvironment and Its Petroleum Geological Significance of the Jurassic Da'anzhai Member in the Central-Eastern Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(3): 1016-1031.

[6] 马素萍,夏燕青,田春桃,等.南襄盆地泌阳凹陷湖相碳酸盐岩烃源岩沉积环境的元素地球化学标志[J].矿物岩石地球化学通报,2013,32(4):456-462.
Ma Suping, Xia Yanqing, Tian Chuntao, et al. Elemental Geochemical Indicators for Sedimentary Environment in Lacustrine Carbonate Source Rocks of the Biyang Depression, Nanxiang Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(4): 456-462.

[7] 左国朝,何国琦.北山板块构造及成矿规律[M].北京:北京大学出版社,1990.
Zuo Guochao, He Guoqi. Plate Tectonics and Metallogenic Regularities in Beishan Region [M]. Beijing: Peking University Press, 1990.

[8] 杨合群,李英,杨建国,等.北山造山带的基本成矿特征[J].西北地质,2006,39(2):78-95.
Yang Hequn, Li Ying, Yang Jianguo, et al. Main Metallogenic Characteristics in the Beishan Orogen[J]. Northwestern Geology, 2006, 39(2): 78-95.

[9] 苗来成,朱明帅,张福勤.北山地区中生代岩浆活动与成矿构造背景分析[J].中国地质,2014,41(4):1190-1204.
Miao Laicheng, Zhu Mingshuai, Zhang Fuqin. Tectonic Setting of Mesozic Magmatism and Associated Metallogenesis in Beishan Area[J]. Geology in China, 2014, 41(4): 1190-1204.

[10] 张振亮,冯选洁,赵国斌,等.东天山—北山地区中生代内生矿床成矿规律[J].西北地质,2022,55(4):280-299.
Zhang Zhenliang, Feng Xuanjie, Zhao Guobin, et al. The Metallogenic Rule of Mesozoic Hypogene Deposits in the Eastern Tianshan-Beishan Area[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 280-299.

[11] 韩小锋,崔海峰,王宝文,等.甘蒙北山盆地群MGD1

井钻获白垩系优质烃源岩及油页岩[J].中国地质，2022，49(5)：1701－1702.
Han Xiaofeng，Cui Haifeng，Wang Baowen，et al. Discovery of Cretaceous High-Quality Source Rocks and Oil Shale Obtained by Well MGD1 in Beishan Basins，Gansu-Inner Mongolia Area[J]. Geology in China，2022，49(5)：1701－1702.

[12] 吴少波，白玉宝，杨友运. 北山盆地群侏罗、白垩系沉积体系及其分布、演化[J].西北大学学报(自然科学版)，2003，33(6)：717－722.
Wu Shaobo，Bai Yubao，Yang Youyun. The Jurassic to Cretaceous Sedimentary Systems and Their Distribution and Evolution in the Beishan Basins Group[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition)，2003，33(6)：717－722.

[13] 党犇，赵虹. 北山盆地群砂岩储层特征及分类评价[J].西安工程学院学报，1998，20(增刊 1)：39－43.
Dang Ben，Zhao Hong. Characteristics and Classific Evaluation of Sandstone Reservoirs in Beishan Basin Group[J]. Journal of Xi'an Engineering University，1998，20(Sup.1)：39－43.

[14] 吴少波，白玉宝. 北山盆地群侏罗—白垩系生储盖特征及油气远景[J].地质科学，2006，41(1)：1－9.
Wu Shaobo，Bai Yubao. Jurassic－Cretaceous Source Rock-Reservoir-Cap Associations and Hydrocarbon Potential in the Beishan Basins[J]. Chinese Journal of Geology，2006，41(1)：1－9.

[15] 靳拥护，常磊，彭成，等. 北山地区中口子盆地地球化学异常特征及其对铀矿勘查指示作用[J].矿产勘查，2020，11(3)：546－552.
Jin Yonghu，Chang Lei，Peng Cheng，et al. Geochemical Anomaly Characteristics and Uranium Deposit Prospecting Indication in Zhongkouzi Basin，Beishan Mountains[J]. Mineral Exploration，2020，11(3)：546－552.

[16] 牛霆，鲁宝龙，戴鹏飞，等. 北山地区残留盆地砂岩型铀成矿潜力分析[J].铀矿地质，2022，38(4)：683－697.
Niu Ting，Lu Baolong，Dai Pengfei，et al. Analysis of Metallogenic Potential of Sandstone-Type Uranium Deposit in Residual Basin of Beishan Area[J]. Uranium Geology，2022，38(4)：683－697.

[17] 任纪舜，王作勋，陈炳蔚，等. 从全球看中国大地构造：中国及邻区大地构造图简要说明[M].北京：地质出版社，1999.
Ren Jishun，Wang Zuosxun，Chen Bingwei，et al. Look at China Tectonic from the Global：A Brief Instruction to the Tectonic Map of China and Adjacent Regions[M]. Beijing：Geological Publishing House，1999.

[18] 沉积岩中总有机碳测定：GB/T 19145—2022[S].北京：中国标准出版社，2022.
Determination of Total Organic Carbon in Sedimentary Rocks：GB/T 19145—2022[S]. Beijing：China Standard Press，2022.

[19] 沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法：SY/T 5163—2018[S].北京：石油工业出版社，2018.
Analysis Method for Clay Minerals and Ordinary Non-Clay Minerals in Sedimentary Rocks by the X-Ray Diffraction：SY/T 5163—2018[S]. Beijing：Petroleum Industry Press，2018.

[20] 化石孢粉分析鉴定：SY/T 5915—2018[S].北京：石油工业出版社，2018.
Analysis and Identification for Fossil Spore and Pollen：SY/T 5915—2018[S]. Beijing：Petroleum Industry Press，2018.

[21] Lazar R O，Bohacs K M，Macquaker J H S，et al. Capturing Key Attributes of Fine-Grained Sedimentary Rocks in Outcrops，Cores，and Thin Sections：Nomenclature and Description Guidelines[J]. Journal of Sedimentary Research，2015，85(3)：230－246.

[22] Johnsson M J. The System Controlling the Composition of Clastic Sediments[J]. GSA Special Publication，1993，284：1－19.

[23] 孙平昌，刘招君，李宝毅，等. 桦甸盆地桦甸组油页岩段地球化学特征及地质意义[J].吉林大学学报(地球科学版)，2012，42(4)：948－960.
Sun Pingchang，Liu Zhaojun，Li Baoyi，et al. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Oil Shale Member of Huadian Formation in Huadian Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition)，2012，42(4)：948－960.

[24] Mclennan S M，Taylor S R，McCulloch M T，et al. Geochemical and Nd，Sr Isotopic Composition of Deep-Sea Turbidites：Crustal Evolution and Plate Tectonic Associations[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta，1990，57(7)：2015－2050.

[25] Mclennan S M，Hemming S R，Mcdaniel D K，et al. Geochemical Approaches to Sedimentation，Provenance and Tectonics[J]. Geological Society of America，1993，284：21－40.

[26] Lambeck A，Huston D，Maidment D，et al.

Sedimentary Geochemistry, Geochronology and Sequence Stratigraphy as Tools to Typecast Stratigraphic Units and Constrain Basin Evolution in the Gold Mineralized Palaeoproterozoic Tanami Region, Northern Australia [J]. Precambrian Research, 2008, 166: 185-203.

[27] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic Environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Comwall: Framework Mode and Geochemical Evidence from Turbiditic Sandstones[J]. Journal of the Geological Society, 1987, 144(4): 531-542.

[28] Wronkiewicz D J, Condie K C. Geochemistry of Archean Shales from the Witwatersr and Supergroup, South Africa: Source-Area Weathering and Provenance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1987, 51(9): 2401-2416.

[29] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites[J]. Nature, 1982, 299: 715-717.

[30] 田巍,王传尚,白云山,等. 湘中涟源凹陷上泥盆统佘田桥组页岩地球化学特征及有机质富集机理[J].地球科学,2019,44(11):3794-3811.
Tian Wei, Wang Chuanshang, Bai Yunshan, et al. Shale Geochemical Characteristics and Enrichment Mechanism of Organic Matter of the Upper Devonian Shetianqiao Formation Shale in Lianyuan Sag, Central Hunan[J]. Earth Science, 2019, 44(11): 3794-3811.

[31] 杨万芹,蒋有录,王勇. 东营凹陷沙三下—沙四上亚段泥页岩岩相沉积环境分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(4):19-26.
Yang Wanqin, Jiang Youlu, Wang Yong. Study on Shale Facies Sedimentary Environment of Lower Es_3-Upper Es_4 in Dongying Sag[J]. Journal of China University of Petroleum, 2015, 39(4): 19-26.

[32] 郑荣才,柳梅青. 鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究[J].石油与天然气地质,1999,20(1):20-25.
Zheng Rongcai, Liu Meiqing. Study on Palaeosalinity of Chang 6 Oil Reservoir Set in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(1): 20-25.

[33] 王益友,郭文莹,张国栋. 几种地化标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J].同济大学学报,1979,7(2):51-60.
Wang Yiyou, Guo Wenying, Zhang Guodong. Application of Some Geochemical Indicators in Determining of Sedimentary Environment of Funing Group (Poleogene), Jinhu Depression, Jiangsu Province[J]. Journal of Tongji University, 1979, 7(2): 51-60.

[34] 王涛,胡能高,杨家喜,等. 东秦岭峡河岩群及有关问题讨论[J].中国区域地质,1997,16(4):415-421.
Wang Tao, Hu Nenggao, Yang Jiaxi, et al. Xiahe Group Complex in East Qinling and Related Problems [J]. Regional Geology of China, 1997, 16(4): 415-421.

[35] Walker C T, Price N B, Wales S. Departure Curves for Computing Paleosalinity from Boron in Illites and Shales[J]. AAPG Bulletin, 1963, 47(5): 833-841.

[36] Walker C T. Evaluation of Boron as a Paleosalinity Indicator and Its Application to Offshore Prospects [J]. AAPG Bulletin, 1968, 52(5): 751-766.

[37] Adams T D, Haynes J R, Walker C T. Boron in Holocene Illites of the Dovey Estuary, Wales, and Its Relationship to Paleosalinity in Cyclothems [J]. Sedimentology, 1965, 4: 189-195.

[38] Couch E L. Calculation of Paleosalinities from Boron and Clay Mineraldata[J]. AAPG Bulletin, 1971, 55(10): 1829-1837.

[39] 钟红利,蒲仁海,闫华,等. 塔里木盆地晚古生代古盐度与古环境探讨[J].西北大学学报(自然科学版),2012,42(1):74-81.
Zhong Hongli, Pu Renhai, Yan Hua, et al. Analysis on Paleosalinity and Paleoenvironment of Late Paleozoic in Tarim Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2012, 42(1): 74-81.

[40] 周洪瑞,王自强,崔新省,等. 华北地台南部中新元古界层系地层研究[M].北京:地质出版社,1999.
Zhou Hongrui, Wang Ziqiang, Cui Xinxing, et al. The Stratigraphic Research of the Meso- and Neo-Proterozoic on the Southern Margin of North China Carton[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999.

[41] 吴智平,周瑶琪. 一种计算沉积速率的新方法:宇宙尘埃特征元素法[J].沉积学报,2000,18(3):395-399.
Wu Zhiping, Zhou Yaoqi. Using the Characteristic Elements from Meteoritic Must in Strata to Calculate Sedimentation Rate[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 395-399.

[42] 张才利,高阿龙,刘哲,等. 鄂尔多斯盆地长7油层组沉积水体及古气候特征研究[J].天然气地球科学,2011,22(4):582-587.
Zhang Caili, Gao Along, Liu Zhe, et al. Study of Character on Sedimentary Water and Palaeoclimate for Chang 7 Oil Layer in Ordos Basin[J]. Natural Gas

Geoscience，2011，22(4)：582－587.

[43] Meyer E E，Quicksall A N，Landis J D，et al. Trace and Race Earth Elemental Investigation of a Sturtian Cap Carbonate，Pocatello，Idaho：Evidence for Ocean Redox Conditions Before and During Carbonate Deposition[J]. Prccambrian Research，2012，192/193/194/195：89－106.

[44] Maslov A V，Podkovyrow V N. Ocean Redox State at 2 500～500 Ma：Modern Concepts[J]. Lithology and Mineral Resources，2018，53(3)：190－211.

[45] 夏鹏，付勇，杨镇，等. 黔北镇远牛蹄塘组黑色页岩沉积环境与有机质富集关系[J]. 地质学报，2020，94(3)：947－956.
Xia Peng，Fu Yong，Yang Zhen，et al. The Relationship Between Sedimentary Environment and Organic Matter Accumulation in the Niutitang Black Shale in Zhenyuan，Northern Guizhou[J]. Acta Geologica Sinica，2020，94(3)：947－956.

[46] 肖斌，郭东旭，冯明飞，等. 渝东北五峰组—龙马溪组黑色页岩有机质富集主控因素[J]. 断块油气田，2024，31(1)：18－25，49.
Xiao Bin，Guo Dongxu，Feng Mingfei，et al. Main Controlling Factors for Organic Matter Enrichment in Black Shale of Wufeng-Longmaxi Formation in Northeast Chongqing[J]. Fault-Block Oil & Gas Field，2024，31(1)：18－25，49.

[47] Hatch J R，Leventhal J S. Relationship Between Inferred Redox Potential of the Depositional Environment and Geochemistry of the Upper Pennsylvanian(Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone，Wabaunsee County，Kansas，USA[J]. Chemical Geology，1992，99(1/2/3)：65－82.

[48] Jones B J，Manning A C. Comparison of Geochemical Indices Used for the Interpretation of Palaeoredox Conditions in Ancient Mudstones[J]. Chemical Geology，1994，111(1/2/3/4)：111－129.

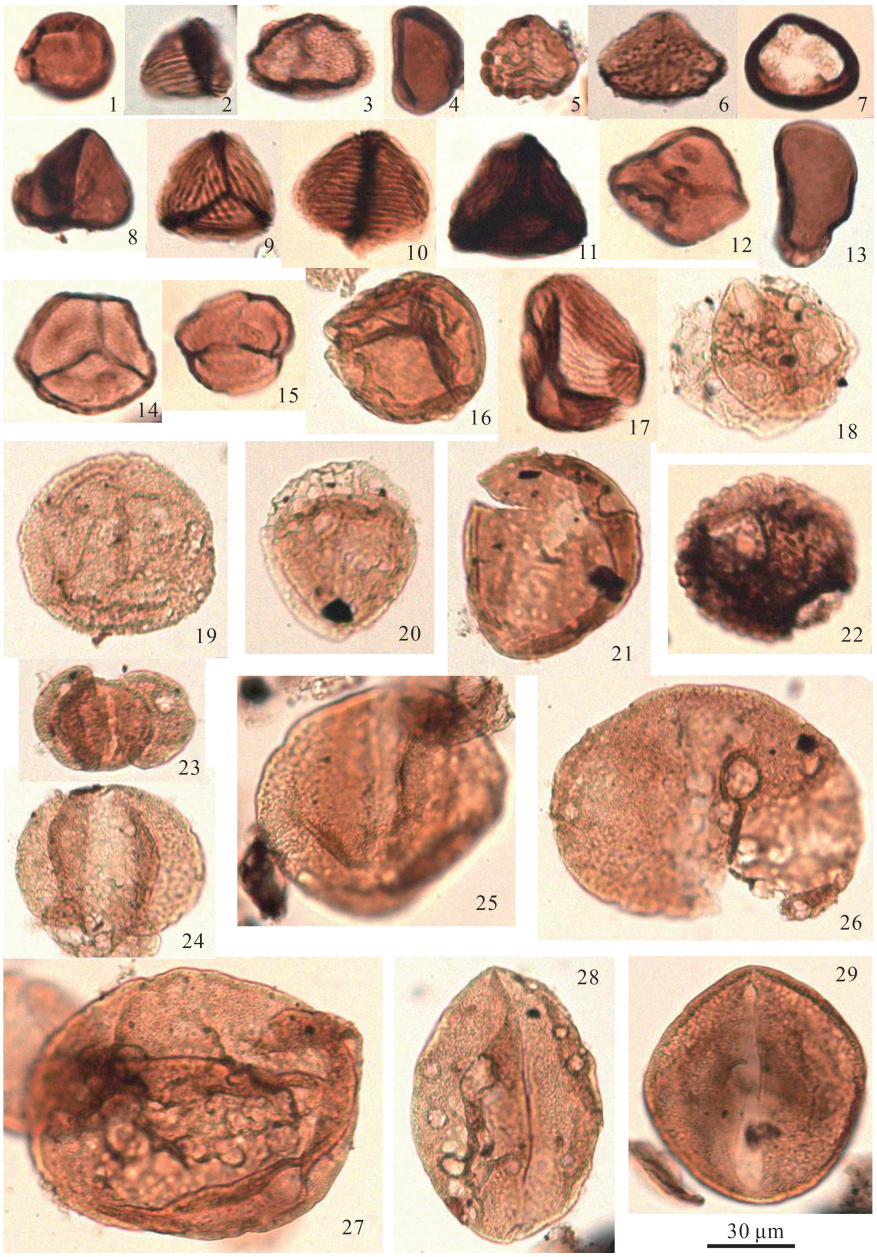
[49] Wright J，Schrader H，Holser W T. Palaeoredox Variations in Ancient Oceans Recorded by Rare Earth Elements in Fossil Apatite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta，1987，51(3)：631－644.

[50] 陈海霞. 川西雅安地区白垩纪古环境古气候研究[D]. 成都：成都理工大学，2009.
Chen Haixian. Research of Paleoenvironment and Paleoclimate of Cretaceous in Ya'an Area of Western Sichuan Basin[D]. Chengdu：Chengdu University of Technology，2009.

[51] 柳蓉，闫旭，刘招君，等. 银额盆地下白垩统巴音戈壁组含油页岩岩系孢粉化石特征及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2020，50(2)：341－355.
Liu Rong，Yan Xu，Liu Zhaojun，et al. Characteristics and Geological Significance of Palynological Fossils from Bayingebi Formation of Lower Cretaceous in Yin'e Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition)，2020，50(2)：341－355.

[52] 徐增连，汤超，魏佳林，等. 大庆长垣南端晚白垩世孢粉组合特征及其古气候记录[J]. 华北地质，2021，44(2)：74－80.
Xu Zenglian，Tang Chao，Wei Jialin，et al. Late Cretaceous Palynological Record and Its Paleoclimate Significance in the Southern of Daqing Placanticline[J]. North China Geology，2021，44(2)：74－80.

图版Ⅰ



1.*Todisporites minor*(BF1)；2.*Cicatricosisporites minor*(BF1)；3.*Osmundacidites parvus*(BF4)；4.*Laevigatosporites gracilis*(BF1)；5.*Pterisisporites undulatus*(BF4)；6.*Foraminisporis wothaggiensis*(BF1)；7.*Classopollis annulatus*(BF1)；8.*Cyathidites minor*(BF2)；9.*Cicatricosisporites sinensis*(BF1)；10.*Cicatricosisporites minutaestriatus*(BF1)；11.*Cicatricosisporites triangularis*(BF1)；12.*Interulobites triangularis*(BF1)；13.*Laevigatosporites gracilis*(BF1)；14.*Polycingulatisporites reduncus*(BF1)；15.*Limatulasporites limatulus*(BF1)；16.*Hsuisporites rugatus*(BF1)；17.*Cicatricosisporites pacificus*(BF1)；18.*Concentrisporites fragilis*(BF6)；19.*Osmundacidites wellmanii*(BF7)；20.*Perinopollenites elatoides*(BF6)；21.*Chasmatosporites hians*(BF6)；22.*Cerebropollenites mesozoicus*(BF1)；23.*Podocarpidites minisculus*(BF2)；24.*Pseudopicea variabiliformis*(BF6)；25.*Pseudopicea rotundiformis*(BF6)；26.*Piceaepollenites exiliodes*(BF4)；27.*Paleoconiferus annulatus*(BF6)；28.*Protoconiferus phyllodes*(BF2)；29.*Protoconiferus oviformis*(BF6)。